



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Estimación de la erosión hídrica potencial en la cuenca
media y alta del río Rímac, aplicación del modelo Rusle**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Juan Felipe QUIÑONEZ CÓNDOR

ASESOR

Douglas Donal SARANGO JULCA

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Quiñones, J. (2019). *Estimación de la erosión hídrica potencial en la cuenca media y alta del río Rímac, aplicación del modelo Rusle*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

Código Orcid del autor (dato opcional): NO TIENE

Código Orcid del asesor o asesores (dato obligatorio): 0000-0001-7963-1507

DNI del autor: 45667914

Grupo de investigación: SIN GRUPO

Institución que financia parcial o totalmente la investigación:

Sin Financiamiento

Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación. Debe incluir localidades y coordenadas geográficas

Cuenca Media-Alta del Río Rímac- Provincia de Huarochirí

Coordenadas: -11.838163 -76.379555

Año o rango de años que la investigación abarcó:

2015 - 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS MODALIDAD (M-1)

Siendo las 12:00 del mediodía del viernes 16 de agosto de 2019, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA y con la asistencia del asesor MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA, y miembros Dr. Ing. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA e Ing. JOSÉ FELICIANO JUÁREZ CÉSPEDES de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de Titulación Profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, del Bachiller:

JUAN FELIPE QUIÑONEZ CÓNDOR

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invita al Bachiller JUAN FELIPE QUIÑONEZ CÓNDOR a realizar la Exposición del Trabajo de Tesis titulada: "ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL EN LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RÍO RÍMAC, APLICACIÓN DEL MODELO RUSLE".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

DIECISEIS

16

El Presidente del Jurado Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller JUAN FELIPE QUIÑONEZ CÓNDOR, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 14:00 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
PRESIDENTE

MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
ASESOR

Dr. Ing. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA
MIEMBRO

Ing. JOSÉ FELICIANO JUÁREZ CÉSPEDES
MIEMBRO

Dedicatoria

Trabajo que dedico a Dios por su presencia en mi
día a día y a mis padres por su incansable
motivación.

Agradecimientos

Al Ing. Douglas Sarango Julca, por sus consejos y enseñanzas como docente en mi época universitaria, así también por brindarme las pautas necesarias como asesor, para la realización de este trabajo.

A mi familia, especialmente a mis padres Juan Quiñonez A. y Adelina Cóndor B., a mis hermanos, a mi tío Emilio Cóndor y a todas las personas que de alguna manera me motivan para seguir y no rendirme en mis proyectos.

Al Ing. Manuel Contreras por el apoyo técnico, al Ing. Jorge Gastelo, al Ing. José Juárez y al Ing. Guido Américo por ser parte del comité evaluador y también por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi formación universitaria.

Contenido

1. Introducción	14
1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Justificación	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo Principal	17
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Hipótesis	18
2. Marco Teórico y Revisión de la Literatura.....	20
2.1 Erosión: Generalidades	20
2.1.1 Agentes y Tipos de Erosión	20
2.2 Erosión Hídrica.....	21
2.2.1 Proceso de la Erosión Hídrica.....	22
2.2.2 Erosión Hídrica Potencial y Erosión Hídrica de Entrega Real	23
2.3 Formas de Erosión Hídrica	26
2.3.1 Erosión Laminar	26
2.3.2 Erosión en Surcos	27
2.3.3 Erosión en Cárcavas.....	27
2.3.4 Erosión por Deslizamientos de Masa.....	28
2.4 Factores que Intervienen en la Tasa de Erosión Hídrica	29
2.4.1 Clima.....	30
2.4.2 Infiltración.	31
2.4.3 Cobertura Vegetal.	32
2.4.4 Característica de los Suelos	34
2.4.5 Pendiente y Topografía	35
2.4.6 Usos de la Suelo.....	36
2.5 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (RUSLE).	36
2.5.1 Factor de erosividad de la lluvia (R).....	38
2.5.2 Factor de erodabilidad del suelo (K).....	39
2.5.3 Factor de longitud de la pendiente e inclinación (LS).	43
2.5.4 Factor de cobertura del suelo (C).....	45
2.5.5 Factor de las prácticas de manejo (P).	45
2.6 Evaluación de la Erosión Hídrica Utilizando un Simulador Físico de Lluvia....	46

2.6.1	Introducción	46
2.6.2	Descripción del Simulador de Lluvia	47
2.6.3	Ventajas y desventajas	48
3.	Descripción General de la Zona de Estudio.....	49
3.1	Ubicación Política y Geográfica	49
3.2	Caracterización de la zona de estudio.....	50
3.2.1	Descripción Hidrográfica.....	51
3.2.2	Clima.....	51
3.2.3	Relieve	52
3.2.4	Agricultura y Vegetación.....	53
4.	Cálculos, Métodos y Materiales	55
4.1	Evaluación de la Erosión utilizando los SIG	55
4.2	Aplicación del Modelo (RUSLE)	56
4.2.1	Obtención del Factor Climático, Erosividad (Factor R).	56
4.2.2	Obtención del factor suelo (K).....	62
4.2.3	Obtención del factor relieve (LS).	66
4.2.4	Obtención del factor de cobertura vegetal (C).....	67
4.2.5	Obtención del factor prácticas de conservación (P).....	69
4.2.6	Esquema Metodológico o Diagrama de Flujo del RUSLE.....	71
4.3	Simulador Físico de Lluvia.....	71
4.3.1	Descripción de las partes	71
4.3.2	Especificaciones técnicas del Simulador	72
4.3.3	Calibración.....	74
4.3.4	Instalación en Campo.....	76
4.3.5	Operación del Simulador	77
4.4	Materiales	79
4.4.1	Equipos y materiales de Campo.....	79
4.4.2	Materiales de Gabinete	80
4.4.3	Materiales de Laboratorio	81
4.4.4	Software	81
4.5	Simulación Física de Lluvia	82
4.5.1	Ubicación	82
4.5.2	Puntos de simulación (zonas de simulación)	82

4.5.3	Generación de erosión Simulada	84
5.	Post Proceso, Análisis y Resultados.....	86
5.1	Erosión Hídrica Modelada (RUSLE)	86
5.1.1	Erosividad - Factor R.....	86
5.1.2	Erodabilidad - Factor K	88
5.1.3	Relieve y Pendiente - Factor LS	90
5.1.4	Cobertura Vegetal - Factor C.....	93
5.1.5	Prácticas de Conservación - Factor P	95
5.2	Pérdida de Suelo Estimada en la Cuenca Media Alta del Río Rímac	95
5.3	Erosión Hídrica Simulada (Simulador de Lluvia)	100
5.4	Análisis Comparativo: Resultados Modelados y Simulados	102
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	104
	Conclusiones	104
	Recomendaciones.....	106
7.	Referencias.....	108
8.	ANEXOS.....	113
	ANEXO A Mapas de Erosión de Suelo	113
	ANEXO B Precipitación Histórica de las Estaciones	118
	ANEXO C Calculo del Factor R.....	124
	ANEXO D Instalación y Operación del Simulador	130
	ANEXO E Pesado y Secado de las Muestras de Simulaciones	132
	ANEXO F Tipos de Cobertura Vegetal Encontradas	134
	ANEXO G Puntos de Simulación en Campo.....	136
	ANEXO H Análisis de Consistencia de la Información	139
	ANEXO I Mapas - Formato A4	154

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Valores estimados del CES según área de cuenca (Fuente: Roehl).	26
Tabla 2.2 Tabla que muestra la erosión producida por eventos, respecto de las intensidades de estas (Fournier, 1972) citado por (Brea & Balocchi, 2010, pág. 10).	31
Tabla 2.3 Clasificación textural de suelos, distribuida en suelos gruesos, medios y finos de acuerdo con el porcentaje de arena, limo y arcilla (Fuente: Elaboración Propia).	42
Tabla 2.4 Valores del sub - factor m (Wischmeier & Smith, 1978).	44
Tabla 4.1 Descripción de las estaciones consideradas (Fuente: Elaboración Propia).	58
Tabla 4.2 Tabla de clasificación textural de suelos según porcentaje de arena limo y arcilla (Sabino Rojas, 2016).	64
Tabla 4.3 Valores de K , método de Kirkby y Morgan 1980 en $(\text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$...	65
Tabla 4.4 Correspondencia del Factor C para cada tipo de cobertura encontrada en el área de estudio (Flores Villanueva & De Lara Suárez, 2015).	68
Tabla 4.5 factor de conservación de suelos para tipos de cultivo a diferentes niveles de pendiente (fact. P), (Wischmeier & Smith, 1978).	70
Tabla 4.6 Ubicación de puntos de simulación - WGS_84 UTM 18S.	83
Tabla 4.7 Precipitación total aplicada y cantidad de sedimento obtenido por simulación. ...	85
Tabla 5.1 Factor R para la cuenca media-alta del río Rímac para el año 2015, donde MJ: Mega Joules (Fuente: Elaboración propia).	86
Tabla 5.2 Distribución geométrica del factor k en nuestra área de estudio. (Fuente: Elaboración propia a partir de clasificación de Kirkby y Morgan).	89
Tabla 5.3 Clasificación de la pendiente (FAO, 2009).	92
Tabla 5.4 Clasificación de la cobertura vegetal por áreas (Fuente: Elaboración propia). ..	94
Tabla 5.5 Rangos de clasificación de la erosión hídrica (Fuente: FAO 1979).	97
Tabla 5.6 Área de afectación según la clasificación de intensidades de erosión en cuenca. (Fuente: Elaboración propia).	98
Tabla 5.7 Erosión hídrica utilizando el Simulador de lluvia en campo, para una precipitación total similar a la del año 2015.	101
Tabla 5.8 Clasificación de la pendiente (FAO, 2009).	102
Tabla 5.9 Cuadro comparativo de los valores de erosión obtenidos en la Simulación en campo y la Erosión modelada con la EUPS (RUSLE).	102
Tabla 8.1 Precipitación acumulada de la Estación Río Blanco (Fuente: SENAMHI)	118
Tabla 8.2 Precipitación acumulada de la Estación Matucana (Fuente: SENAMHI)	119
Tabla 8.3 Precipitación acumulada de la Estación Chosica (Fuente: SENAMHI)	120
Tabla 8.4 Precipitación acumulada de la Estación Santa Eulalia (Fuente: SENAMHI)	121

Tabla 8.5	<i>Precipitación acumulada de la Estación Canchacalla (Fuente: SENAMHI).....</i>	<i>122</i>
Tabla 8.6	<i>Precipitación acumulada de la Estación Santiago de Tuna (Fuente: SENAMHI)</i>	<i>123</i>
Tabla 8.7	<i>Calculo del factor R para la Estación Río Blanco (Fuente: Elaboración Propia)</i>	<i>124</i>
Tabla 8.8	<i>Calculo del factor R para la Estación Matucana (Fuente: Elaboración Propia).</i>	<i>125</i>
Tabla 8.9	<i>Calculo del factor R para la Estación Chosica (Fuente: Elaboración Propia). .</i>	<i>126</i>
Tabla 8.10	<i>Calculo del factor R para la Estación Santa Eulalia (Fuente: Elaboración Propia)</i>	<i>127</i>
Tabla 8.11	<i>Calculo del factor R para la Estación Canchacalla (Fuente: Elaboración Propia).</i>	<i>128</i>
Tabla 8.12	<i>Calculo del factor R para la Estación Matucana (Fuente: Elaboración Propia).</i>	<i>129</i>
Tabla 8.13	<i>Valores de precipitación mensual de las estaciones de Río Blanco y Matucana en el año 2004 (Fuente: SENAMHI)</i>	<i>147</i>

Lista de Figuras

Figura 1.1	<i>Mapa de Intensidades de Erosión de Suelos del Perú (Fuente: INRENA, 1996).</i>	19
Figura 2.1	<i>Proceso de la producción de sedimentos en cuencas hasta la entrega a un río (Fuente: Gracia Sánchez, J. – UNAM).</i>	22
Figura 2.2	<i>Disgregación del suelo por el impacto de una gota de lluvia (Catalanes, 2010)</i>	23
Figura 2.3	<i>Distribución espacial de las formas de erosión hídrica existentes a nivel de cuenca hidrográfica (Fuente: Elaboración Propia).</i>	26
Figura 2.4	<i>Erosión por surco en acceso rural en el distrito de Santa Eulalia – Huarochirí. (Fuente: Elaboración propia).</i>	28
Figura 2.5	<i>Cárcava generada por escorrentía estacional en el Distrito de Pachacamac-Lima (Fuente: Elaboración Propia).</i>	28
Figura 2.6	<i>Quebrada Pedregal Luriganchu-Chosica (Fuente: Elaboración propia)</i>	29
Figura 2.7	<i>Quebrada Nicolás de Piérola; Márgenes afectados por erosión del cauce (Fuente: Elaboración propia).</i>	29
Figura 2.8	<i>Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica (Fuente: Elaboración Propia).</i>	30
Figura 2.9	<i>Variación de la infiltración de agua por textura del suelo (Fuente: Comet Program).</i>	32
Figura 2.10	<i>En la imagen se aprecian raíces expuestas debido a la erosión de impacto producida bajo árboles de copas altas (Fuente: Sidney Schwartz - Pennsylvania).</i>	33
Figura 2.11	<i>Las raíces superficiales (A) son las más adecuadas para controlar la erosión hídrica y eólica. Las raíces más profundas (B y C) ayudan a prevenir movimientos de masas en pendientes pronunciadas (García-Chevesich, 2008).</i>	34
Figura 2.12	<i>Componentes del simulador de lluvia (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008)</i>	47
Figura 2.13	<i>Esquema del simulador de lluvia (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008).</i>	48
Figura 3.1	<i>Mapa de ubicación del área de estudio a nivel de provincias (Fuente: Elaboración Propia).</i>	50
Figura 3.2	<i>Especies arbóreas: a) Árbol de membrillo, b) Plantaciones de plátanos, c) Árboles de granada. (Fuente: Elaboración propia).</i>	53
Figura 3.3	<i>Vegetación en la región frígida: a) Papas, b) Maíz, c) Ichu.</i>	54
Figura 3.4	<i>Zona de huaicos en la yunga Marítima, quebrada Pedregal – Chosica (Fuente: Peruland)</i>	54
Figura 3.5	<i>San Jerónimo de Surco en la región Quechua (Fuente: Elaboración propia)</i>	54
Figura 3.6	<i>Ticlio o Abra de Antícona en Huarochirí pertenece a la región Puna (Fuente: El Comercio).</i>	55

Figura 4.1 Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas Convencionales Consideradas (Fuente: Elaboración propia.).....	57
Figura 4.2 Portal de SoilGrids que proporciona datos de propiedades y clases de suelo a nivel mundial.	63
Figura 4.3 Esquema de la regadera (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008).....	72
Figura 4.4 Dimensiones y vista de perfil de la regadera (Elaboración propia).....	73
Figura 4.5 Vista de planta inferior de la regadera (Elaboración propia).....	74
Figura 4.6 Esquema de llenado del simulador (Fuente: Elaboración propia, Monge 2007).	75
Figura 4.7 Instalación del simulador de lluvia en el campo (Fuente: Elaboración propia).77	
Figura 4.8 Operación del simulador: Llenado, revisión y puesta en marcha de la simulación (Fuente: Elaboración Propia).	78
Figura 4.9 Inicio y final de la simulación (Fuente: Elaboración propia)	79
Figura 4.10 Mapa de los puntos donde se realizaron las simulaciones en campo.....	83
Figura 4.11 Simulación en el distrito de San Mateo de Otao.	84
Figura 5.1 Mapa de Erosividad – Factor R (2015).	87
Figura 5.2 Mapa de Erodabilidad del Suelo – Factor K.	88
Figura 5.3 Mapa de Pendientes o topográfico – Factor LS.....	91
Figura 5.4 Mapa de Cobertura Vegetal – Factor C.	93
Figura 5.5 Mapa de Erosión Anual (ton/ha/año).....	96
Figura 5.6 Zonas de gran producción de sedimentos por erosión laminar; (a) Laderas de cultivo de tuna, (b) Acceso a los cultivos de Tuna, (c) Cultivos jóvenes en el distrito de Cocachacra. (Fuente: Elaboración propia).	99
Figura 5.7 Zonas de cobertura vegetal denominada Bosque Denso; (a) Quebrada donde se cultiva plantas típicas, (b) Acceso vial al poblado de Cumbe, San Mateo de Otao y Canchacaya, (c) Vista panorámica de los cultivos en el poblado de Cumbe. (Fuente: Elaboración propia).....	100
Figura 5.8 Cobertura vegetal natural elegida para una de las simulaciones (Fuente: Elaboración propia).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 7.1 Mapa de Erosión de Suelos del 2014.	114
Figura 7.2 Mapa de Erosión de Suelos del 2015.....	115
Figura 7.3 Mapa de Erosión de Suelos del 2016.....	116
Figura 7.4 Mapa de Erosión de Suelos del 2017.....	117
Figura 7.5 Instalación y operación del simulador: a) Instalación de la base metálica y nivelación con las patas de aluminio regulables, b) Colocación de las fronteras de simulación, la transición guía y el recipiente receptor de muestras, c) Llenado del contenedor de agua	

mediante una manguera, d) Toma de datos iniciales antes de la simulación. Lugar: San Miguel de Viso – Huarochirí..... 131

Figura 7.6 Final de la simulación: a) Destapar el extremo del tubo aireador para dar inicio a la simulación, b) Recolección de la muestra de sedimento y agua. 131

Figura 7.7 Proceso de secado y pesado de muestras en laboratorio: a) Balanza y muestra en recipiente sin fugas, b) Se vierte el recipiente en su totalidad (agua y sedimento) en la bandeja de secado, c) Se procede a secar la muestra en su totalidad. 132

Figura 7.8 Proceso de secado y pesado de muestras en laboratorio: a) Se introduce la bandeja al horno, b) Horno para secado de muestras, c) Pesado del recipiente más la muestra seca, d) Pesado del recipiente solo para calcular el peso de la muestra. 133

Figura 7.9 Formaciones rocosas, Puente Verugas - Huarochirí (Fuente: Elaboración Propia) 134

Figura 7.10 Cobertura Natural – Huariqueña, Huarochirí (Fuente: elaboración propia). 134

Figura 7.11 Pastos Naturales y Zona urbana – San Jerónimo de Surco (Fuente: Elaboración Propia)..... 134

Figura 7.12 Miles de hectáreas de cultivos de tuna, Cocachacra – Huarochirí (Fuente: Elaboración propia)..... 134

Figura 7.13 Suelo erosionable desnudo, Cocachacra - Huarochirí (Fuente: Elaboración propia)..... 135

Figura 7.14 Área agrícola o cultivo a nivel, San Bartolomé – Huarochirí (Fuente: Elaboración propia)..... 135

Lista de Gráficos

Gráfico 2.1 Área de la cuenca versus coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (Fuente: ASCE).....	25
Gráfico 2.2 Variabilidad de la infiltración para diferente tipo de suelo (Fuente: Teófila Reynoso 2012).....	32
Gráfico 2.3 “Diagrama que muestra la velocidad mínima que se necesita para desprender, transportar o depositar una partícula de dimensiones características” (Fuente: Hjulstrom, 1935).	35
Gráfico 2.4 Nomograma de Erodabilidad del Suelo	40
Gráfico 2.5 Clases texturales de suelos según dimensiones de las partículas, de acuerdo con el United States Departament of Agriculture (USDA).....	42
Gráfico 4.1 Análisis visual de 28 años de precipitación histórica (Elaboración Propia).	59
Gráfico 4.2 Análisis doble masa para obtener los periodos dudosos mediante los quiebres n_1 , n_2 y n_3 (Villón Béjar, 2016).	60
Gráfico 4.3 Portal del USGS para la descarga de Modelos Digitales de Elevación DEM. ..	67
Gráfico 4.4 Diagrama de flujo para una correcta determinación del factor C.	69
Gráfico 5.1 Diagrama de distribución de texturas en la Cuenca Media Alta del Río Rímac (Fuente: Elaboración propia).....	90
Gráfico 5.2 Distribución en porcentajes de las áreas con pendientes clasificadas (Fuente: elaboración propia).	92
Gráfico 5.3 Distribución porcentual de la cobertura vegetal del área (Fuente: Elaboración propia).....	94
Gráfico 5.4 Erosión Hídrica Simulada versus la Erosión Hídrica Modelada para la cuenca media y alta del río Rímac.	103
Gráfico 8.1 Comparación de gráficos de series históricas entre las estaciones de Santa Eulalia y Chosica.....	142
Gráfico 8.2 Comparación de gráficos de series históricas entre las estaciones de Santiago de Tuna y Canchacaya.....	142
Gráfico 8.3 Análisis doble masa para identificar la estación base entre la estación Chosica y Santa Eulalia.....	143
Gráfico 8.4 Análisis doble masa para identificar la estación base entre la estación Canchacalla y Santiago de Tuna.	143
Gráfico 8.5 Análisis doble masa que muestra comportamientos diferentes de las estaciones, ya que estas se encuentran muy distanciadas entre sí.....	144
Gráfico 8.6 Análisis doble masa para obtener los periodos de estudio de la estación Chosica.	145

Gráfico 8.7 *Análisis doble masa para obtener los periodos de estudio de la estación Santiago de Tuna..... 145*

Gráfico 8.8 *Línea de regresión lineal para completación de datos del año 2004 de las estaciones Río blanco y Matucana (Fuente: Elaboración propia)..... 147*

1. Introducción

En los últimos años la región Yunga en el Perú ha atravesado por muchos fenómenos naturales que causaron desastres en gran magnitud, dichos fenómenos ocasionaron daños en poblados rurales, parcelas agrícolas y a la morfología de terrenos preservados refiriéndonos al desprendimiento de grandes cantidades de suelo a consecuencia de eventos lluviosos de larga y moderada duración e intensidad. El desprendimiento de estos volúmenes de suelo por acción de las precipitaciones se le conoce como erosión hídrica.

Nuevas parcelas de cultivo en lugares no adecuados transforman de manera irreversible la fisonomía de las cuencas generando características nuevas y alterando la dinámica hidrológica, geomorfológica, edáfica y botánica. Por otro lado, en las cuencas naturalmente erosionables, la mala distribución poblacional en cauces aluviales, expone a estas a erosión de cimientos y desprendimiento de taludes.

La producción potencial de sedimentos de una cuenca es una variable estimada por modelos empíricos poco certeros, generando la necesidad de aplicar un modelo de base física para la estimación de este parámetro con posteriores aplicaciones de gran utilidad como la sedimentación en reservorios (Irrigaciones), manejo de agua de contacto¹ (Minería) y Calidad de agua (Medio Ambiente).

¹ A nivel internacional, las **aguas de contacto** son conocidas como aguas ácidas, las cuales son generadas producto de un proceso denominado “drenaje ácido”, el cual es originado cuando las aguas de origen natural (precipitaciones) entran en contacto con botaderos, depósito de relaves y pueden transportarse al medio ambiente a través de cursos de agua superficiales o subterráneos.

En la actualidad el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) potencian los métodos y análisis para la evaluación de datos espaciales y con ello se hace posible la aplicación de métodos tales como la Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Renard et al., 1997), o Revised Universal Soil Loss Equation Modified - MUSLE (Williams 1975) extendida hoy en día a cuencas hidrográficas.

El objetivo de este trabajo de investigación es la de aplicar la metodología RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos o EUPS) para estimar la tasa de sedimento producido por erosión hídrica a nivel anual en el área de estudio, así como la variación geoespacial del potencial erosivo.

1.1 Antecedentes

A nivel nacional, los limitados estudios y datos disponibles del fenómeno de la erosión hídrica incentivaron este trabajo. De esta manera se tuvo que utilizar referencias de investigaciones internacionales para tener un espectro más amplio de la aplicación y estudio del fenómeno.

A continuación, mencionaremos algunos estudios realizados en el Perú y en países de Sudamérica:

En el mes de Julio del año 2001, el Ing. Cayo Leonidas Ramos Taipe presenta su trabajo de recopilación e investigación denominado **Modelamiento Ambiental para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la Cuenca Media y Alta del Río Cañete y Determinación del Mapa de Erosión**. El objetivo de esta investigación es la “estimación de la tasa de erosión en la cuenca media y alta del Río cañete utilizando un soporte informático (GIS)”; así mismo se mencionan las alternativas y formas de cálculo de los factores que integran el modelo USLE el

cual describe como una ecuación semi empírica. En resumen, se utilizó la distribución de la información geográfica a diferentes escalas, las variables características de cada zona y la superposición de mapas temáticos en un entorno digital para su cálculo con el fin de identificar zonas de riesgo de erosión y la estimación de sedimentos movidos. (Perú)

En el año 2016, Evelin Daysi Sabino Rojas presenta tu trabajo de investigación para optar por el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo denominado **Análisis espacio - temporal de erosión de suelos por regiones hidrológicas en el Perú (1981 - 2014)**. Esta tesis se enfoca en la estimación del potencial erosivo a nivel nacional tomando en consideración unidades hidrográficas denominadas Regiones Hidrográficas (HALCROW 2010), que tuvieron como base la delimitación de Unidades Hidrográficas elaborado con la metodología Pfafstetter (SIG-IRH / INRENA, 2008). El desarrollo de esta investigación considera el modelo RUSLE con ecuaciones básicas del modelo en conjunto a ecuaciones alternativas que dan buena estimación de predictibilidad a nivel nacional, así mismo utilizó un modelo numérico de ajuste de distribución de la precipitación desarrollado por el SENAMHI llamado PISCO. (Perú)

El Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA en el año 1996, en base a trabajos de la ex ONERN editó a nivel cualitativo un **Mapa de Intensidades de Erosión de Suelos del Perú (Figura 1.1)**, utilizando información cartográfica, representada por cartas nacionales, fotografías aéreas e imágenes captadas mediante radar y satélite. La clasificación de las cuatro unidades de intensidad de erosión (Muy Ligera, Ligera, Moderada y Severa) obedece a diversos factores como: origen, posición fisiografía, variación litológica, influencia antrópica y climática. Esta información está disponible en formato digital en el “Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación” SINPAD <https://goo.gl/hpLVwY>. (Perú)

En el año 2015 Franklin David Campaña Zapata presenta su investigación como tesis de grado **Aplicación del Modelo RUSLE para el Cálculo de Erosión Hídrica en la Microcuenca Del Río Perlaví**. La erosión reduce la productividad de la tierra y tiene gran impacto en los países cuyo sistema económico se basa en la producción agropecuaria como es en el Ecuador. Esta investigación evalúa la erosión hídrica en la microcuenca del río Perlaví mediante dos metodologías, la primera con el uso de un simulador de lluvia en campo y la segunda mediante la “Ecuación Universal de Perdidas de Suelo Revisada o EUPS” (RUSLE) usando como herramienta “Sistemas de Información Geográfica”. (Ecuador).

1.2 Justificación

La estimación del sedimento producido en una cuenca por erosión hídrica e introducido a los cauces de ríos principales, es un proceso complicado y muchas veces desconocido para diversos estudios en la ingeniería hidráulica. Otro justificante importante para esta investigación es la falta de información geoespacial a escala adecuada de áreas altamente expuestas a la erosión hídrica y metodologías prácticas para cuantificarlas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal

Determinación de las zonas expuestas a erosión hídrica en la cuenca media alta del río Rímac y estimar la producción potencial anual de sedimentos con la aplicación del modelo RUSLE.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obtener los factores o parámetros que componen el modelo RUSLE utilizando metodologías más prácticas. El factor erodabilidad del suelo, erosividad, factor topográfico, cobertura vegetal y prácticas de conservación, para la cuenca en estudio.
- Determinar los valores de erosión hídrica puntuales mediante un simulador de lluvia utilizado en campo.
- Comparar las tasas modeladas con la ecuación RUSLE y las simuladas en campo con el simulador de lluvia.
- Obtener mediante registros de eventos lluviosos históricos las tasas de erosión a nivel multianual en la cuenca de estudio.

1.4 Hipótesis

Es posible estimar la tasa de aportación potencial de sedimentos de la cuenca media alta del río Rímac y así mismo identificar los sectores con alto grado de vulnerabilidad a la erosión hídrica mediante la aplicación del modelo RUSLE y Sistemas de Información Geográfica a mayor detalle.

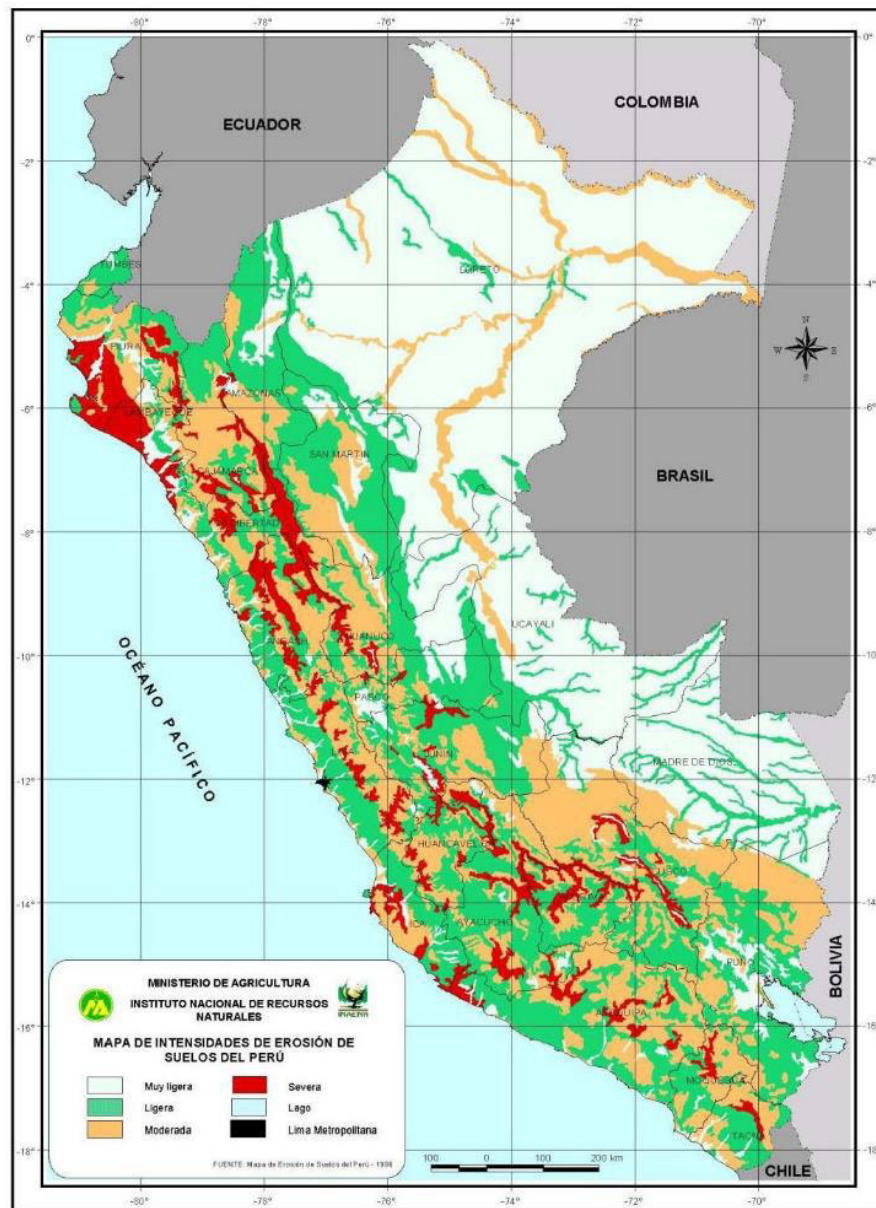


Figura 1.1 Mapa de Intensidades de Erosión de Suelos del Perú (Fuente: INRENA, 1996).

2. Marco Teórico y Revisión de la Literatura

2.1 Erosión: Generalidades

La erosión es el proceso de desprendimiento, movimiento y deposición de las partículas superficiales debido a un factor de impacto externo, cuya fuerza motriz es la gravedad.

2.1.1 Agentes y Tipos de Erosión

La erosión natural es ocasionada por diversos factores y es un proceso lento e imperceptible en la mayoría de los casos. La superficie de la tierra es afectada por procesos exógenos y endógenos, los primeros tienden a nivelar, mientras que los segundos tratan de formar un nuevo relieve es decir contribuyen a la formación de suelos, estos se hacen notables sólo en periodos largos de tiempo.

Según la FAO (2002), “los agentes más importantes que actúan en la erosión, son el agua y el viento. En función de esto se conoce dos tipos de erosión, la **eólica** y la **hídrica**”. “A nivel mundial la hídrica es el tipo más importante de degradación de suelos y ocupa aproximadamente 1093 millones de hectáreas (56%) del área total afectada por degradación de suelo inducida por el hombre. La erosión eólica es, a continuación, la que afecta mayor superficie y ocupa 548 millones de hectáreas (28%) del área afectada” (INETER & COSUDE, 2005, pág. 13).

Existen dos tipos de erosión hídrica:

- a. **Erosión Natural/Geológica:** En este tipo de erosión incurren solamente fuerzas naturales. Dentro de estas se encuentra la erosión: hídrica (pluvial, fluvial, marina, glacial, cárstica), eólica y gravitacional.
- b. **Erosión Inducida o “Antrópica”:** En este caso nos referimos a la erosión natural sumada a la producida por acción del hombre, ocasionando con ello el rompimiento del equilibrio natural entre los suelos, agua, viento y demás agentes que intervienen.

2.2 Erosión Hídrica

La erosión hídrica es definida como el proceso de desprendimiento y posterior arrastre de partículas de suelo por el agente agua. La lluvia desprende partículas que se transporta a través del flujo de agua de escorrentía que termina sedimentando ladera o aguas abajo (**Figura 2.1**). “La cobertura vegetal, el tipo, las características del suelo, la geomorfología, la geología y los usos de este, establecen el grado de propensión del suelo a ser afectado por los agentes generadores de erosión” (Ramos Taipe, 2001, pág. 2).

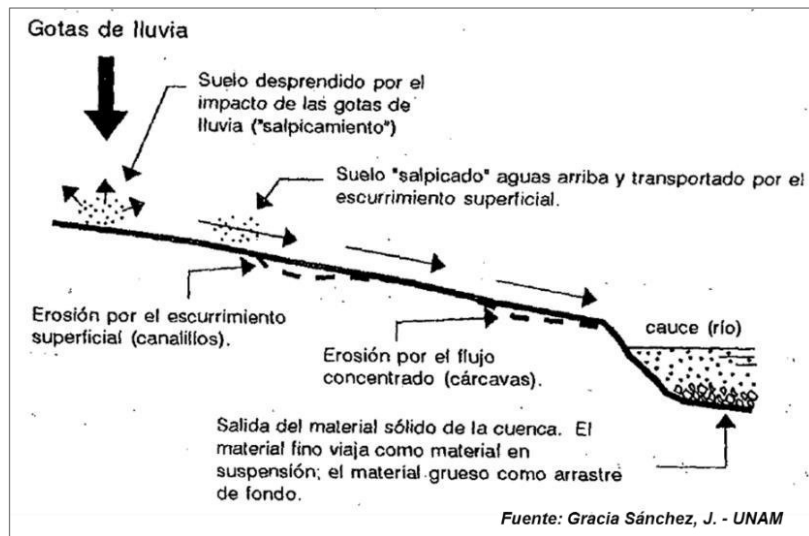


Figura 2.1 Proceso de la producción de sedimentos en cuencas hasta la entrega a un río (Fuente: Gracia Sánchez, J. – UNAM)

2.2.1 Proceso de la Erosión Hídrica

“La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas de suelo por acción de los siguientes agentes principales” (Cisneros, y otros, 2012, pág. 61):

- La energía de la lluvia: La energía de gotas de lluvia, se disipa al caer sobre la superficie del suelo, produciendo un rompimiento de los agregados que se desprenden para luego ser arrastrados pendientes abajo (**Figura 2.2**).
- La escorrentía: Este proceso superficial logra desprender el suelo debido a la velocidad de flujo y el caudal característico. Este agente produce los fenómenos erosivos más visibles (cárcavas). “Se distinguen dos tipos de flujo: El flujo laminar (mantiforme), de velocidad lenta y el flujo turbulento o flujo en surcos, con una velocidad que puede llegar a 4m/s, responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos” (Morgan R.

, 1995). La acción de la gravedad acelera el proceso erosivo pues está les da velocidad a los flujos turbulentos en cárcavas y acelera flujos laminares y los hace más erosivos.



Figura 2.2 Impacto de una gota de lluvia sobre el suelo (Catalanes, 2010)

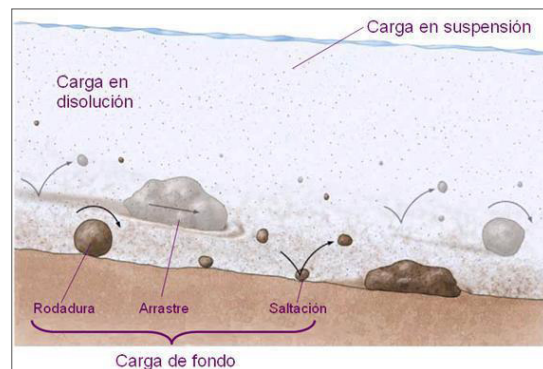


Figura 2.3 Transporte de sedimentos en un curso de agua (Bolívar, Rivero, Urbina , & Yepez, 2016)

2.2.2 Erosión Hídrica Potencial y Erosión Hídrica de Entrega Real

“No es posible comparar la carga de sedimentos en las corrientes con la pérdida de suelo en la cuenca, pues gran parte de los sedimentos producidos en cuenca son depositados en ella y solo cierto porcentaje llega a las corrientes”. “Futuros estudios deben profundizar en metodologías para estimar el porcentaje de la producción de sedimentos de la cuenca que se introducirán como sedimentos del cauce de un río”. “Algunos autores plantean la utilización de un coeficiente de entrega. Para utilizar dicha metodología en nuestro medio se requiere un trabajo de calibración y validación previa” (Carvajal & Giráldez, 2000, págs. 225-236) citado por (Montoya, Montoya, & Anaya, 2005, pág. 131).

Coeficiente de Entrega de Sedimentos (CES)

Este coeficiente es un factor de ajuste que estima y compensa la producción de sedimentos de la cuenca en un punto de cause principal del río, en donde teóricamente se vertería dicho sedimento producido. Es así que se infiere que solamente una parte del sedimento producido por la cuenca entra a la red hidrográfica de la cuenca o es introducido a un determinado curso de agua en un punto determinado.

$$V_s = V * CES \quad (2.1)$$

Donde:

V_s = Es el aporte de sedimentos de una cuenca a una corriente principal en ton/(ha*año); V = Es el volumen potencial de sedimentos producidos por la cuenca (tema de esta investigación); CES = Es el coeficiente de entrega de sedimentos (%).

“El valor del CES depende de la distancia del área de análisis al cuerpo principal de agua”. “El valor del coeficiente será menor para cuencas productoras de sedimentos alejadas de los cursos de agua” (Hairston, 2001). Generalmente se utiliza el área de una cuenca como característica determinante para hallar este coeficiente.

A continuación, se muestran algunas metodologías utilizadas para hallar este coeficiente:

Método I:

$$\log(CES) = 1.94 - 0.14\log(A) \quad (2.2)$$

Donde:

A = Es el área de la Cuenca (km²)

Fuente: Maner (2010)

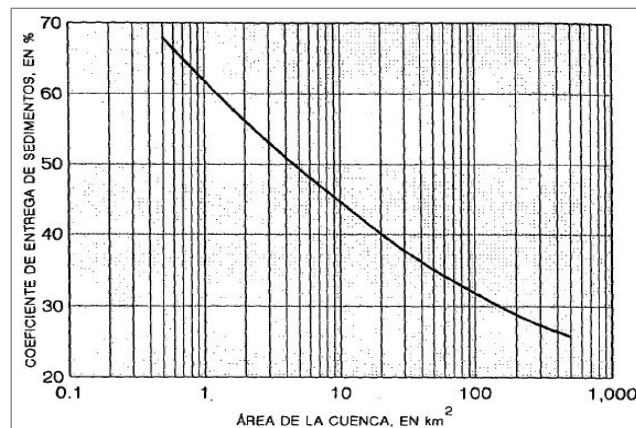
Método II:

Gráfico 2.1 Área de la cuenca versus coeficiente de entrega de sedimentos en porcentaje (Fuente: ASCE)

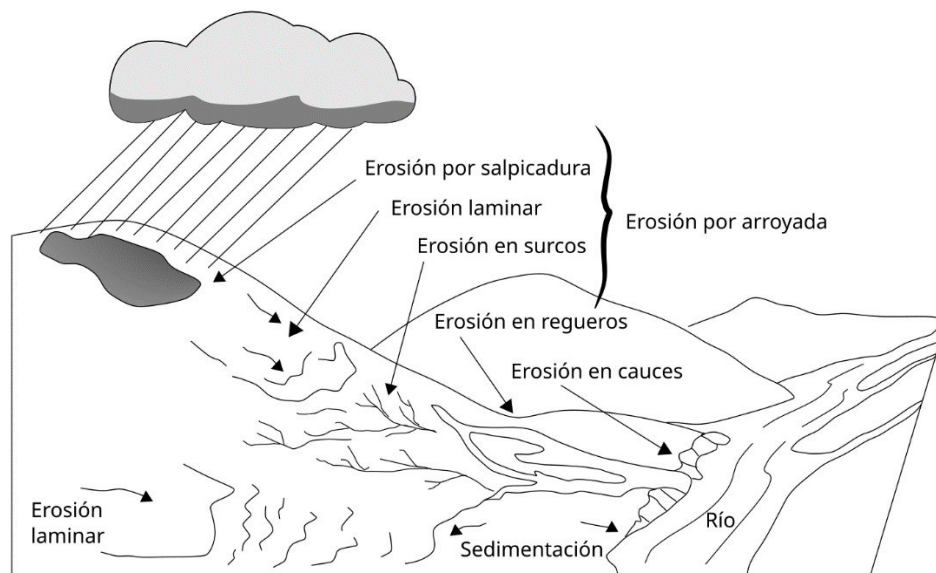
Método III:

A1, en Km ²	CES 1, en %
0.026	65.0
0.259	44.0
2.589	29.0
25.889	18.0
258.888	9.5
1553.329	5.0

Tabla 2.1 Valores estimados del CES según área de cuenca (Fuente: Roehl).

$$CES = CES_1 * (A_1/A)^{0.2} \quad (2.3)$$

2.3 Formas de Erosión Hídrica

**Figura 2.4** Distribución espacial de las formas de erosión hídrica existentes a nivel de cuenca hidrográfica (Fuente: Elaboración Propia).

2.3.1 Erosión Laminar

Luego del impacto de la lluvia, estas gotas se mueven ladera abajo en la delgada lámina, a esta delgada lámina de escorrentía se le conoce como erosión laminar. La degradación de la agricultura se da muchas veces por la erosión laminar y con ello la disminución del espesor superficial del suelo conocido como horizonte A.

“Lo lógico es que la erosión laminar afecte en mayor medida a suelos de gran pendiente, pero también puede darse en gran medida con pendientes de solo 1 o 2% (baja pendiente) en suelos descubiertos” (Martinez, 1983).

Según muchos autores la pérdida de suelo por erosión laminar contribuye a la pérdida de nutrientes que dificultan la productividad agrícola cuando se pierden las capas superficiales con un rango que va desde 15% hasta 75% de pérdida de productividad.

2.3.2 Erosión en Surcos

En este fenómeno la esorrentía se concentra en pequeños canales hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos, así mismo posee gran energía para desprender partículas y transportarlas.

“En la medida que aumenta la velocidad del flujo, el agua incide en el suelo y se forman los arroyuelos, que son canales continuos de anchura reducida y escasa profundidad, pudiendo ser eliminados por la labranza agrícola” (Valcarsel, 1989, pág. 84).

2.3.3 Erosión en Cárcavas

Al estado mas avanzado de los surcos se les denomina cárcavas, estos varían en dimensiones en función del caudal, la pendiente y que tan erosionable sea el suelo. Básicamente de las cárcavas son surcos de grandes dimensiones.

“Estas cárcavas son de gran tamaño y profundidad y generalmente de llevan agua solo después de grandes precipitaciones en la cuenca funcionando como drenaje temporal de la misma” (FAO, 2000) (**Figura 2.6**).



Figura 2.5 Erosión por surco en acceso rural en el distrito de Santa Eulalia – Huarochirí.
(Fuente: Elaboración propia).



Figura 2.6 Cárcava generada por escorrentía estacional en el Distrito de Pachacamac-Lima
(Fuente: Elaboración Propia).

2.3.4 Erosión por Deslizamientos de Masa

“Los deslizamientos de masa se dan cuando las condiciones necesarias se dan, estas pueden ser la pendiente, la humedad del terreno, así como el tipo de suelo” según (Cisneros, y otros, 2012). Los suelos expuestos a deslizamientos se asientan en bases impermeables como la rosa produciéndose en dicha interface la fluidez por efecto mecánico y una disminución de resistencia al corte, o en otras palabras la lubricación de las bases.

En cuencas altamente lluviosas este tipo de fenómeno a producido grandes catástrofes en todo el mundo y en el Perú (**Figura 2.7**), y se les conoce generalmente como: flujos de lodo, desprendimiento de ladera, huaicos² y otros.

² Múltiples tragedias en el distrito de Lurigancho Chosica (marzo del 2017) tuvieron origen en este fenómeno. Vidas humanas y una pérdida millonaria en activos fueron la consecuencia de la poca prevención y planificación para contra restar estos fenómenos naturales que se convirtieron en desastres (**Figura 2.8**).



Figura 2.7 Quebrada Pedregal Lurigancho-Chosica (Fuente: Elaboración propia)



Figura 2.8 Quebrada Nicolás de Piérola; Márgenes afectados por erosión del cauce (Fuente: Elaboración propia)

En el presente estudio solo se evaluará cuantitativamente la erosión laminar y la erosión en surcos, es decir la cantidad de sedimento que mueven estas formas de erosión hídrica, pues el modelo RUSLE está formulado para estimar este tipo de erosión.

2.4 Factores que Intervienen en la Tasa de Erosión Hídrica

La erosión Hídrica es un proceso muy dinámico, así como complejo, el cual está sujeto a muchas causas y factores en una cuenta hidrográfica (**Figura 2.9**).

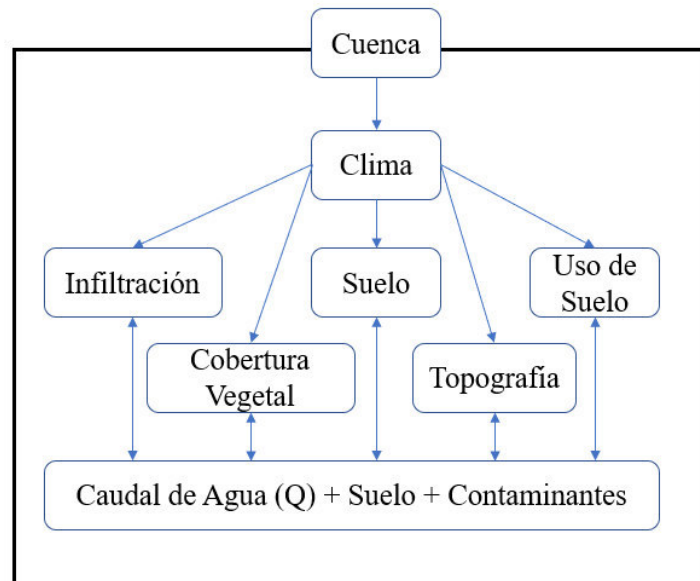


Figura 2.9 Componentes que intervienen en este tipo de erosión (Fuente: Elaboración Propia).

Según (Morgan R. , 2005) “El proceso de erosión y sedimentación dependen del tipo de erosión (laminar, surcos o cárcavas)”. Sin embargo, como regla general, la erosión que ocurre en un área en específico dependerá directamente de las siguientes variables:

2.4.1 Clima.

Según (García-Chevesich, 2008), “la energía cinética de la precipitación de lluvia es el factor influyente en mayor medida, pero con considerando que algunas tormentas tienen una mayor capacidad de erosión que otras”. “La erosionabilidad del evento toma en consideración la cantidad de lluvia caída o la intensidad de esta”. Podemos inferir que tormentas mu intensas puedes producir gran cantidad de sedimentos tanto por salpicadura o impacto para disgregar como en el caudal que generarían flujo laminar y surcos.

“Pese a que la intensidad de la tormenta se encuentra en directa relación con la erosión y sedimentación producida, son las de intensidad intermedia las que, en el largo plazo, producen la mayor cantidad de pérdida de suelo” (Morgan R. , 2005). Lo anterior se entiende debido a una combinación entre periodo de retorno y erosión unitaria (**Tabla 2.2**).

“Intensidad Máxima en 5 min” (mm/h)	“Numero de tormentas”	“Erosión por Tormenta” (t/ha)	“Erosión Total” (t/ha)
0 - 25.4	40	3.7	148
25.5 - 50.8	61	6	366
50.9 - 76.2	40	11.8	472
76.3 - 101.6	19	11.4	216.6
101.7 - 127.0	13	34.2	444.6
127.1 - 152.4	4	36.3	193.5
151.5 - 177.8	5	38.7	193.5
177.9 - 254.0	1	47.9	47.9

Tabla 2.2 Tabla que muestra la erosión producida por eventos, respecto de las intensidades de estas (Fournier, 1972) citado por (Brea & Balocchi, 2010, pág. 10).

2.4.2 Infiltración.

Este proceso se da cuando el agua llega a penetrar los intersticios del suelo, logrando así que dicho suelo se comporte como espacio de almacenamiento para el agua. “El estado o condición inicial del suelo o la cubierta vegetal son factores que influyen en la infiltración, además de la porosidad, conductividad hidráulica y el contenido de humedad con el cual se encuentra el suelo” (Chow, Maidment, & Mays, 1994, pág. 45).

Cuando ocurre la precipitación de lluvias la velocidad con la cual el agua ingresa al suelo disminuye con el tiempo (

Gráfico 2.2), hasta que dicha velocidad no varía y se da la infiltración estabilizada o básica.

La capacidad de infiltración de un suelo está en directa relación con la generación de escurrimiento superficial, así como de otros procesos. “Los suelos sin estructura definida, así como los de estructura granular, por lo general poseen una alta capacidad de infiltración, es decir que son menos susceptibles a la erosión laminar” (PHI-LAC, 2010) citado por (Campana Zapata, 2015, pág. 5). También podemos mencionar que los suelos con estructura más definida o con alto grado de impermeabilidad son más erosionables ya que tienen una tasa de infiltración menor.

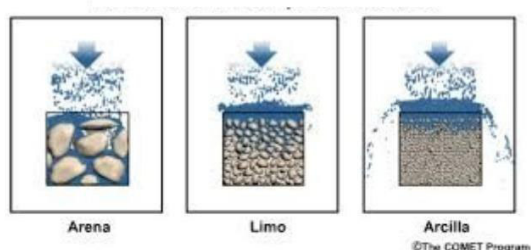


Figura 2.10 Variación de la infiltración de agua por textura del suelo (Fuente: Comet Program).

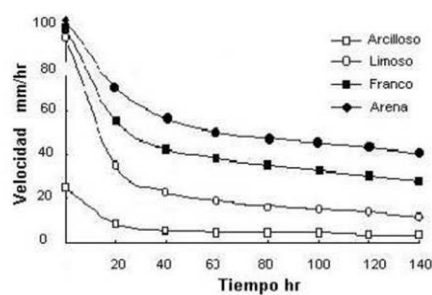


Gráfico 2.2 Variabilidad de la infiltración para diferente tipo de suelo (Fuente: Teófila Reynoso 2012)

2.4.3 Cobertura Vegetal.

La cobertura vegetal actúa como una cobertura del suelo frente al intemperismo y los fenómenos meteorológicos, en especial actúan como protectores de la erosión, absorbiendo la energía cinética con la que precipitan las gotas. Además, según (Morgan R. , 1997) “los tallos, hojas y ramificaciones actúan como protectores, así también los sistemas de raíces proveen de consistencia a los suelos y les dan una estructura más compacta es decir menos erosionable”.

La erosión también se da luego del impacto de las gotas sobre vegetación alta o árboles, pues luego del impacto inicial, esta gota cae nuevamente sobre el terreno produciendo disgregación del mismo hasta con un 90% de su energía total (**Figura 2.11**).



Figura 2.11 Foto en donde se aprecian raíces expuestas gracias a la erosión producida por las gotas que caen de las hojas. (Fuente: Sídney Schwartz - Pennsylvania).

“Como regla general, mientras más densa y homogénea sea la cubierta vegetal, mayor es su efectividad en la disminución de la erosión laminar” (García-Chevesich, 2008).

Las raíces de la vegetación ayudan a sujetar el suelo en el caso de raíces poco profundas y en el de las profundas, mantienen la consistencia de los suelos para evitar deslizamientos, movimientos de masa en pendiente y falla de taludes.

“Por estas razones el establecimiento de plantas es la forma más efectiva de controlar la erosión y la sedimentación, ya que esto trae como consecuencia que las tasas de pérdida de suelo disminuyan significativamente” (Morgan R. , 2005).

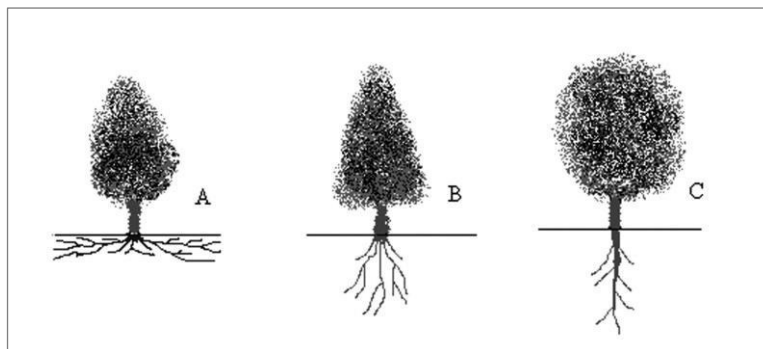


Figura 2.12 Raíces poco profundas (A). Raíces de relativa profundidad (B y C) (García-Chevesich, 2008).

2.4.4 Característica de los Suelos

“No todos los suelos son iguales en términos de su resistencia a la erosión. La erodabilidad de un suelo en particular está en función de variables como textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad” (Morgan R. , 2005). “La textura de un suelo es importante para definir su nivel de erodabilidad, pues no todas las clases texturales se erosionan con la misma facilidad” (Morgan R. , 2005).

“Si bien las partículas más finas son más livianas, éstas poseen una mayor superficie de contacto entre ellas y, por lo tanto, una mayor cohesividad, lo que las hace más resistentes a la erosión” (Morris & Fan, 1997). “Por otro lado, las partículas más gruesas son más pesadas, lo que también aumenta su resistencia a la erosión. Sin embargo, las partículas medianas (0.1 a 1mm) no poseen cohesividad ni peso relevante, por lo que son éstas las más erosionables” (Morris & Fan, 1997).

Es por eso que se toma en consideración el porcentaje de limo ya que esta textura intermedia es la que le da la característica más o menos erosiva al suelo en cuestión, esta clase de textura se encuentra en dimensiones entre de arcilla y arena.

En el siguiente gráfico se muestra las velocidades promedio de flujo y el diámetro de partículas susceptible a transporte, erosión o deposición. **Gráfico 2.3.**

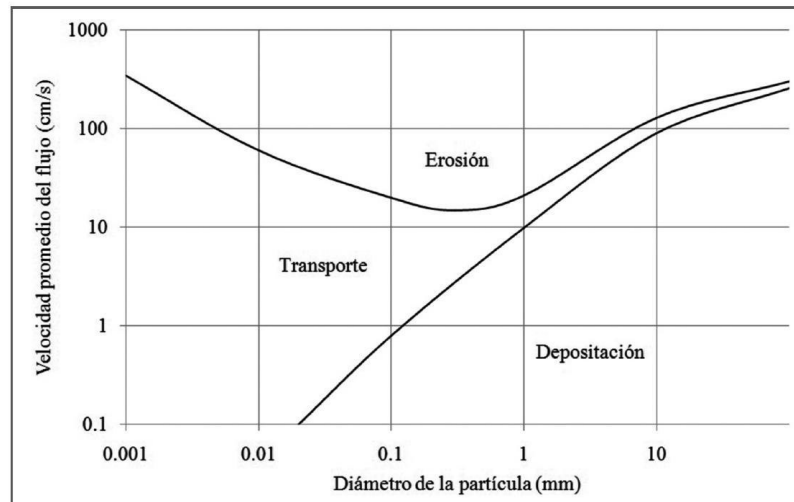


Gráfico 2.3 “Diagrama que muestra la velocidad mínima que se necesita para desprender, transportar o depositar una partícula de dimensiones características” (Fuente: Hjulstrom, 1935).

2.4.5 Pendiente y Topografía

La cantidad y velocidad del flujo están definidos por la topografía, es decir a mayor o menor pendiente y longitud de la topografía, el flujo tendrá un comportamiento más o menos erosionable. “La distancia horizontal en la que viaja una partícula de suelo desprendida por el impacto de una gota de lluvia está en directa relación con la inclinación de la pendiente” (Morgan R. , 2005) citado por (García-Chevesich, 2008).

“En un terreno en pendiente, más partículas de suelo son salpicadas pendiente abajo que pendiente arriba, aumentando así la proporción en función de la inclinación de la pendiente” (Morgan R. , 1997).

“Las formas de la pendiente también influyen en las tasas de erosión, pues éstas cambian a medida que varía la inclinación del terreno” (Terrense, Foster, & Renard, 2002).

2.4.6 Usos de la Suelo

La ampliación de terrenos de cultivo, la tala de bosque para adecuación agrícola, agricultura en terrenos inclinados, sobrepastoreo, construcción de accesos son acciones que favorecen a la erosión hídrica y aumentan su tasa anual.

2.5 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (RUSLE).

Existen en la actualidad varios modelos de erosión de suelos, tales como USLE, RUSLE, WEPP (Morgan 2005). El modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) constituye una actualización reciente del modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) desarrollado por Wischmeier y Smith (1978). El modelo es de tipo paramétrico y cuantifica la erosión de suelo a partir de una serie de factores tales como el poder erosivo de la lluvia (erosividad), la susceptibilidad del suelo a la erosión (erodabilidad), topografía del lugar y la protección que ejerce la cobertura vegetal del área.

“RUSLE³ es conveniente para estimar erosión media anual de una pendiente. Se utiliza sólo para calcular la pérdida de suelo por erosión laminar y erosión en surcos (no para erosión en cárcavas)” (Renard & Foster, 1997)

En la descripción de Mannaters (1999) RUSLE es usado en mayor medida para:

³ RUSLE es denominada también EUPS en castellano, por las siglas de Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo.

- Predecir la pérdida potencial de suelo promedio a largo plazo en condiciones de campo específicas, usando un sistema específico de manejo (SIG⁴).
- Para predecir erosión en surcos, en pastos y cultivos.
- La pérdida de suelos calculado por el modelo es la cantidad de sedimento perdido por el perfil, no la cantidad de sedimento que deja la cuenca o se introducen a los cursos de agua permanentes.

La ecuación RUSLE está expresa y compuesta por los parámetros siguientes:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2.4)$$

Donde:

- A: “Es la perdida de suelo promedio anual” ($ton \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$).
- R: “Factor de erosividad de las lluvias⁵” ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot año^{-1}$).
- K: “Es el factor de erodabilidad del suelo” ($ton \cdot ha \cdot hr \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$).
- LS: “Factor topográfico en función de la longitud L y pendiente S” (adimensional).
- C: “Factor de cobertura vegetal del área de estudio” (adimensional).
- P: “Es el factor de conservación de la estructura del suelo” (adimensional).

⁴ SIG: Sistemas de Información Geográfica

⁵ MJ hace referencia a Mega Joule que es la unidad derivada del Sistema Internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor.

2.5.1 Factor de erosividad de la lluvia (R).

“El factor R representa la erosividad de la precipitación pluvial, que se define como la capacidad potencial de la lluvia para provocar erosión”. “Es una función de dos características de las lluvias intensas: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos” (Cisneros, y otros, 2012, pág. 76).

En su formulación original, el autor plantea que la erosividad se contabiliza o calcula considerando la erosividad de cada tormenta, y es el producto de la energía total de la lluvia por la intensidad máxima en 30 min, como se aprecia en la siguiente fórmula.

$$R = \frac{\sum (EI_{30})_i}{N} \quad (2.5)$$

En la ecuación (2.5) se muestra:

“**EI**” es la energía total de la tormenta por el máximo de intensidad de la tormenta en 30 minutos (EI: energía-intensidad).

“**N**” es el número de tormentas erosivas en un periodo de n años. Para una localidad en particular se halla **R** “Índice de Erosividad de la lluvia”, sumando los promedios anuales de “EI”.

Para utilizar la metodología anterior es necesario información de precipitación muy pormenorizada, la cual es de difícil obtención, debido a esto, muchos autores han señalado la dificultad que existe en poder aplicar esta formulación en muchos territorios en donde la red pluviográfica existente es escasa o de irregular distribución, como el caso de Perú. En esta investigación y su área de aplicación solo se encontró una sola estación meteorológica que cuenta con un pluviógrafo activo perteneciente al SENAMHI.

Sin embargo, pese a lo mencionado, contamos con registros cuantitativos de precipitaciones mensuales otorgados por pluviómetros instalados desde hace muchos años por el SENAMHI, los cuales se utilizaron para la determinación del factor R.

En la actualidad se cuentan con algunas formulaciones que permiten calcular de forma más sencilla el índice de erosividad de la lluvia (factor R) como la relación empírica (2.6) desarrollada por (Wischmeier & Smith, 1978) que además ha sido aplicada en diversos estudios como en el de (Sabino Rojas, 2016) mostrando gran eficacia.

La siguiente relación desarrollada por (Wischmeier & Smith, 1978) fue la que se aplicó:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{\left(1.5 \log \left(\frac{P_i^2}{p} \right) - 0.08188 \right)} \quad (2.6)$$

Donde:

R = “factor de erosividad de lluvias” ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot año^{-1}$)

P_i = “precipitación mensual (mm)”

p = “precipitación anual en (mm)”

2.5.2 Factor de erodabilidad del suelo (K).

Este factor cuantifica la susceptibilidad de la pérdida de suelo valiéndose de parámetros como la textura del suelo, estructura y demás. El factor K varía entre 0 a 1, el menor valor para suelos no erosivos y el valor de 1 para suelo totalmente desnudos y totalmente susceptibles a la erosión.

Como ya se mencionó con anterioridad suelos altamente obedecen a que su composición es de texturas intermedias como los limos.

“Suelos de texturas fina con alto contenido de arcilla tienen bajos valores de K”. “Suelos de textura gruesa tales como suelos arenosos, tienen valores bajos, debido al bajo escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles”. “Suelos de texturas mediana (franco limoso) tienen valores de K moderado, porque son moderadamente susceptibles al desprendimiento y a la vez producen moderados escurrimientos” (Mannaerts, 1999).

Algunos métodos como el de (Wischmeier & Smith, 1978), que propone una ecuación para determinar el valor de K considerando los siguientes factores: porcentaje de limo y arena fina, contenido de materia orgánica (%) y estructura/permeabilidad del suelo. De esa forma se pudo inferir el nomograma que a continuación se muestra.

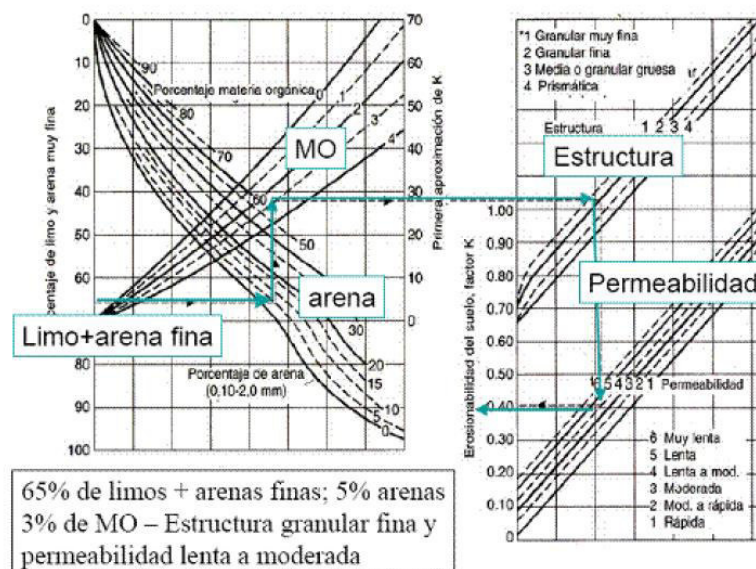


Gráfico 2.4 Nomograma de Erodabilidad del Suelo

Ecuación de regresión desarrollada por (Wischmeier & Smith, 1978) a partir de las mismas variables representativas:

$$K = \frac{[10^{-4} \cdot 2.71 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - MO) + 4.20(s - 2) + 3.23(p - 3)]}{100} \quad (2.7)$$

Donde:

K = “factor de Erodabilidad del suelo” ($ton \cdot ha \cdot hr \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$).

MO = “Materia orgánica” (%).

s = “Código de la estructura del suelo”.

p = “Código de permeabilidad”.

M = “es el producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (%limo + %arena muy fina) * (100 - %arcilla)”.

“Respecto a la utilización de la ecuación y nomograma mostrado líneas arriba, no se dispone de información de la mayoría de estos parámetros pues su obtención exige realizar análisis de laboratorio y/o experiencias de campo en puntos representativos del área de estudio, trabajos laboriosos y de considerable costo”. “Una alternativa es recurrir a la información litológica aprovechando que existe una estrecha relación entre el tipo de suelo de una zona y el material parental subyacente, y más importante todavía, no es difícil encontrar cartografía geológica a una escala medianamente aceptable” (Gisbert Blanquer, Ibañez Asensio, & Moreno, 2012).

“Cuando no se cuente con los datos necesarios de suelos para utilizar el nomograma antes mencionado, la FAO propuso un método sencillo para estimar el Factor K” (Senamhi,

2018). “En este método se utiliza la unidad de clasificación del suelo FAO/UNESCO y la textura como parámetro para determinar K” (FAO,1980), (**Gráfico 2.5**).

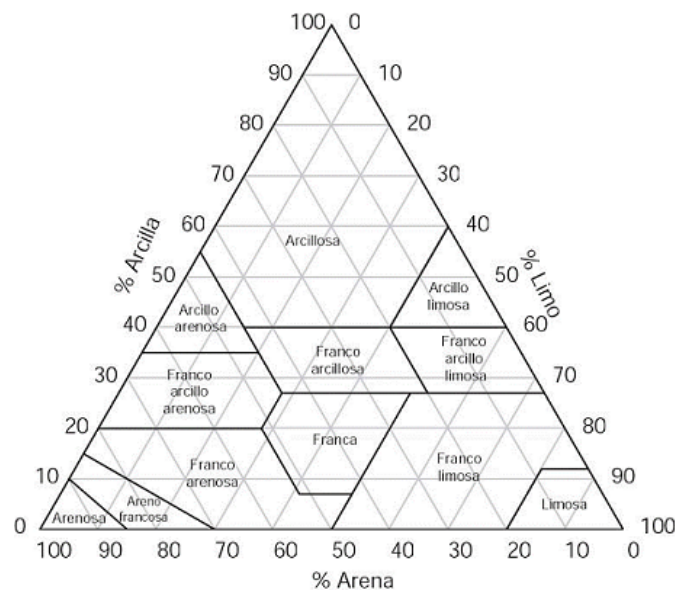


Gráfico 2.5 Clases texturales de suelos según dimensiones de las partículas, de acuerdo con el United States Department of Agriculture (USDA).

Nombre de los suelos (Textura General)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural	Nro	Textura
Suelos Francos (textura moderadamente fina)	0 - 45	0 - 40	40 - 100	Arcilloso	1	Fina
	0 - 20	40 - 60	40 - 60	Arcilloso limoso	2	
	45 - 65	0 - 20	35 - 55	Arcilloso Arenoso	3	
Suelos Arcillosos (textura fina)	0 - 20	40 - 73	27 - 40	Franco Limoso Arcilloso	4	
	45 - 80	0 - 28	20 - 35	Franco Arenoso Arcilloso	5	
	20 - 45	15 - 52	27 - 40	Franco Arcilloso	6	
Suelos Francos (textura mediana)	0 - 20	88 - 100	0 - 12	Limoso	7	Media
	20 - 50	74 - 88	0 - 27	Franco Limoso	8	
	23 - 52	28 - 50	7 - 27	Franco	9	
Suelos Arenosos (textura gruesa)	86 - 100	0 - 14	0 - 10	Arenoso	10	Gruesa
	50 - 70	0 - 50	0 - 20	Franco Arenoso	11	
Suelos Francos (textura moderadamente gruesa)	70 - 86	0 - 30	0 - 15	Arenoso Franco	12	

Tabla 2.3 Clasificación textural de suelos, distribuida en suelos gruesos, medios y finos de acuerdo con el porcentaje de arena, limo y arcilla (Fuente: Elaboración Propia).

Una vez obtenidos los porcentajes de arena, limo y arcilla distribuidas geoespacialmente, se puede reclasificar dentro del Diagrama Triangular de Clases Texturales de la USDA (**Tabla 2.3**) y proporcionar a cada una de ellas el factor K de erodabilidad correspondiente.

2.5.3 Factor de longitud de la pendiente e inclinación (LS).

El factor LS (factor combinado) de RUSLE es un factor netamente topográfico dependiente de las longitudes y pendientes del terreno a evaluar, en este caso a nivel de cuenca hidrográfica.

En el desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (EUPS), el factor LS consideró inicialmente una distancia de una parcela estándar de 22.3m y 9% de pendiente (condición de referencia). Este factor representa la proporción de pérdida de suelo de una longitud e inclinación dada. Valores mayores a 1 representan condiciones más erosivas que la condición de referencia.

“La longitud se define como la distancia desde el origen de la escorrentía hasta el punto donde decrece la pendiente y da inicio al depósito de sedimentos, o que la escorrentía se concentre en un canal o cauce de salida” (Miliarium 2012).

Existe un procedimiento sencillo de cálculo, a partir de datos obtenidos con lotes de escurrimiento, de esta manera el factor L, está definido por la siguiente relación:

Longitud de la pendiente (Factor L):

$$L = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \quad (2.8)$$

Donde:

L = es el factor de longitud de pendiente.

x = Longitud de la pendiente (m).

m = es el sub factor m (coeficiente).

El exponente de longitud de pendiente “ m ” determina la relación entre erosión en surcos y erosión entresurcos.

Aquí se muestra la variación de m en función a la gradiente:

“Grado de la pendiente” (%)	“Valores de m ”
< 1	0.2
< 3 - > 1	0.3
< 5 - > 3	0.4
> 5	0.5

Tabla 2.4 Valores del sub - factor m (Wischmeier & Smith, 1978).

Grado de pendiente (Factor S):

La inclinación es directamente proporcional a la intensidad de erosión pues este factor otorga velocidad al flujo generado. A mayor inclinación mayor pérdida de suelo.

$$S = 0.065 + 0.045(s) + 0.0065(s)^2 \quad (2.9)$$

Donde:

S = es el factor de gradiente de la pendiente.

s = gradiente de la pendiente (%).

Factor LS

El factor LS de la ecuación universal de pérdidas de suelo puede ser encontrado de la siguiente manera:

$$LS = 0.065 + 0.045(s) + 0.0065(s)^2 \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \quad (2.10)$$

Se debe señalar que los valores del factor LS son adimensionales.

2.5.4 Factor de cobertura del suelo (C).

“El factor C es considerado factor atenuante y toma valores de 0 a 1, correspondiendo el valor de la unidad al suelo desnudo, sin cobertura vegetal y en barbecho continuo” (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2007).

Se entiende que cuando la cobertura vegetal es poca el valor de C es grande, y cuando la vegetación es mas densa el valor de C disminuye.

Si un factor C de 0.15 representa el sistema de manejo de un determinado cultivo, esto significa que la erosión será reducida en 15% de la cantidad que hubiera ocurrido bajo condiciones de barbecho continuo.

2.5.5 Factor de las prácticas de manejo (P).

“Las prácticas mecánicas o manejo del terreno son un factor atenuante del proceso erosivo. Su principal objetivo es controlar los escurrimientos superficiales para disminuir la erosión hídrica en terrenos con pendiente” (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2007).

Considerando estas prácticas de manejo como cultivos en contorno, fajas y terrazas, P depende de la pendiente del terreno, su cálculo es a través de tablas y sus valores varían de entre 0 y 1. Cuando no existen prácticas de conservación P es igual a 1.

2.6 Evaluación de la Erosión Hídrica Utilizando un Simulador Físico de Lluvia

2.6.1 Introducción

“La necesidad de entender la dinámica física de la lluvia y su interacción con el suelo, hacen indispensable la creación de quipos y/o mecanismos con los cuales se logre controlar sus parámetros de entrada y cuantificar los de salida”. “Con el pasar de las décadas, estos simuladores de lluvia (desde los años 60) fueron explicando de mejor manera la dinámica, distribución, intensidad, la energía cinética de impacto y demás factores característicos” (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008).

Fundamento

La importancia de reproducir fielmente las características de la lluvia es limitada muchas veces por la simplicidad de equipos y la eficiencia en costos, es así que existen actualmente muchos modelos adaptables a cada tipo de ensayo a realizar. Existen principales características las cuales deben simular estos equipos, los cuales son la velocidad de las gotas de lluvia que se refiere a la energía cinética, el tamaño de las gotas y su distribución.

Las variables se deben controlar en un simulador son la intensidad de la lluvia simulada y el tiempo de simulación de esta, es así que esta investigación se construyó un modelo de simulador adecuado trasportable y de bajo costo debido a los recursos disponibles.

2.6.2 Descripción del Simulador de Lluvia

Este simulador de lluvia está compuesto de por partes metálicas de aluminio, fierro y acrílico (**Figura 2.13**), entre ellos se los parantes de metal, piezas de ajuste de metal y el recipiente principal de acrílico, material transparente y resiste para este volumen a contener.

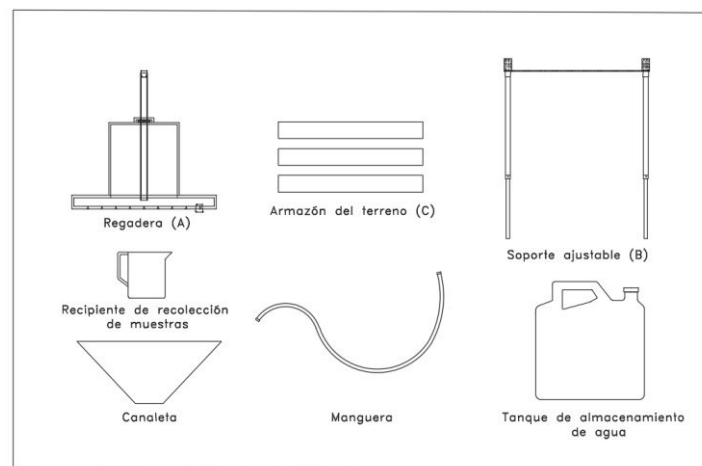


Figura 2.13 Componentes del simulador de lluvia (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008)

En la siguiente figura se muestran las 3 partes primordiales del equipo (**Figura 2.14**):

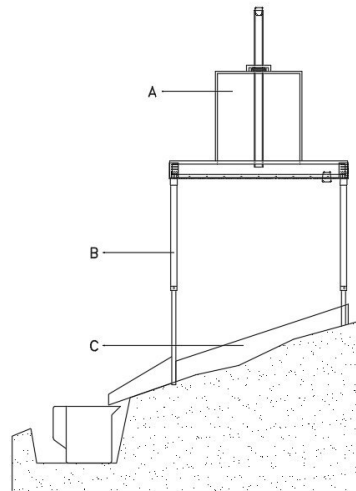


Figura 2.14 Partes instaladas del simulador (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008).

- A. Volumen contenedor de agua, el cual almacena la cantidad de agua necesaria para la simulación, esta a su vez contiene el área de distribución uniforme de gotas en tiempo y espacio.
- B. Parantes de aluminio regulable, el cual ayudará a la nivelación del equipo en terrenos poco uniformes y agrestes.
- C. Láminas metálicas que confinan el área de prueba, estas láminas impedirán el paso del flujo de agua vertido sobre la superficie de control del simulador y garantizan el recojo de los sedimentos erosionados.

2.6.3 Ventajas y desventajas

Una de las desventajas de estos simuladores de lluvia es definitivamente el no poder simular con precisión el potencial erosivo de las lluvias en toda el área de estudio, ya que a más precisión de la estimación de la erosión se necesitarán más puntos de simulación y uso del

simulador en campo. La mayor ventaja del mismo es que posee las medidas adecuadas que lo hacen muy portable así mismo el poder adecuarlo a topografía accidentada.

3. Descripción General de la Zona de Estudio

En este capítulo se detallará la ubicación de la zona de estudio, el régimen climático, las actividades productivas y el relieve característico de esta zona, así como también su comportamiento hidrológico.

El fenómeno de erosión hídrica se presenta en parte de la sierra y en aumenta en la región Yunga, todo esto debido a sus condiciones semiáridas, altas pendientes del terreno y frecuentes tormentas lluviosas de diferentes intensidades.

3.1 Ubicación Política y Geográfica

La cuenca media-alta del río Rímac se encuentra ubicada inicialmente en la región Yunga a unos 800 msnm entre los distritos de Lurigancho Chosica - Lima y Ricardo Palma en la provincia de Huarochirí por el Oeste; así mismo esta cuenca se extiende hasta los 5480 msnm en la región Janca o Cordillera limitando con el departamento de Junín provincia de Yauli por el Este.

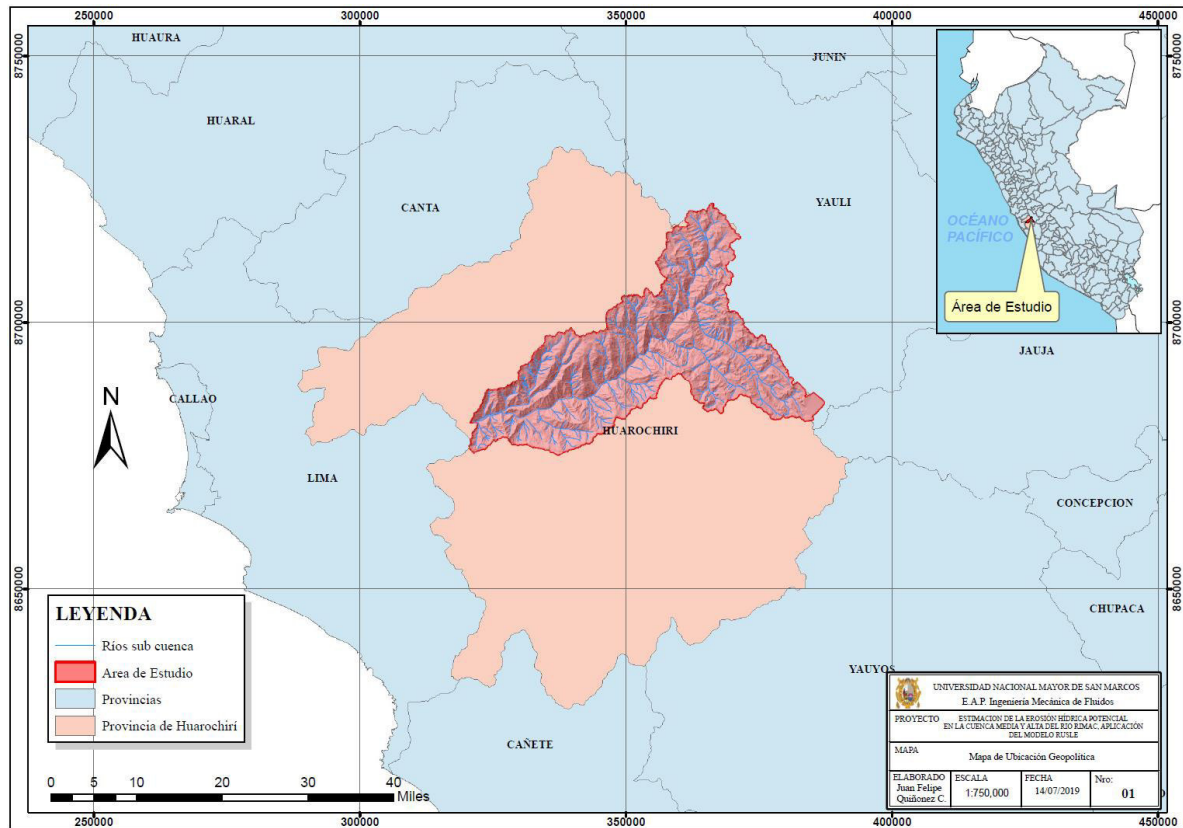


Figura 3.1 Mapa de ubicación del área de estudio a nivel de provincias (Fuente: Elaboración Propia).

La superficie de estudio se encuentra entre los meridianos $76^{\circ}38'45.23''$ (distrito de Ricardo Palma-Hrí.) y $76^{\circ} 2'4.78''$ (San Mateo) longitud oeste; y entre los paralelos $11^{\circ}33'13.38''$ (Distrito de Chicla – Hrí.) y $11^{\circ}58'47.29''$ (Santiago de Tuna) de latitud Sur.

3.2 Caracterización de la zona de estudio.

El área de estudio en donde se enfocará esta investigación tiene una superficie aproximada de 1230.00 km^2 y se encuentra dentro de la jurisdicción de la provincia de Huarochiri que pertenece al departamento de Lima – Perú.

3.2.1 Descripción Hidrográfica

PROVINCIA DE HUARACHIRÍ

Está situada en la zona centro del Perú en la parte central y oriental del departamento de Lima. Abarca y una superficie de 5 657.93 km². “La provincia tiene una población de 72 845 habitantes, de los cuales 49 334 (67.8%) viven en área urbana y 23 511 (32.2%) en área rural” (Proyectos Wikimedia, 2019).

Huarocharí está dividida en 32 distritos y tiene como capital a Matucana la cual es también llamada “La Ciudad del eterno sol radiante”. Matucana se ubica en el valle del río Rímac, accesible por la carretera central y vía férreo de Lima a Junín.

“Huarochirí comprende las regiones naturales de Yunga, Quechua, Suni, Puna y Janca, cada cual con peculiaridades climáticas, ecológicas y paisajísticas propias”. “La altitud de su territorio está comprendida entre los 1000 msnm en las cuencas, y los 5755 m. en los picos nevados de la cordillera Pariakaka” (Garcia, 2015).

3.2.2 Clima

El clima del área de estudio se encuentra clasificado inicialmente como característico de la región Yunga Marítima (región occidente de la Cordillera de los Andes) iniciando en el distrito de Ricardo Palma a unos 900 metros sobre el nivel del mar, tiene un clima subtropical árido o semiárido⁶ con poca vegetación; nuestra área de estudio se extiende hasta unos 5480 msnm en la región Janca o cordillera.

⁶ El **Clima Sub Tropical Árido** se caracteriza por tener una temperatura media anual de 18.2°C y la ausencia de lluvias regulares.

“La yunga marítima presenta un relieve accidentado que alterna quebradas angostas y profundas que fueron modeladas por los cursos fluviales. En estas quebradas suelen encontrarse pequeñas áreas de cultivos llamadas terrazas fluviales” (Wikimedia, 2019).

“Se caracteriza por ser una zona de huaicos (**Figura 3.4**), zona endémica, zona frutera, zona de construcción de centrales hidroeléctricas y zona de esparcimiento” (Wikimedia, 2019).

Al ascenso de nuestra área de estudio podemos encontrar climas propios de la región Quechua⁷ con temperaturas medias anuales de entre 11 y 16°C (templado) así como también lluvias abundantes entre diciembre y marzo (**Figura 3.5**). Pasando los 3500 msnm en la región Suni dentro de nuestra área de estudio encontramos un clima templado frío en donde las temperaturas medias fluctúan entre los 7 y los 10°C así mismo presenta precipitación abundantes en meses de verano (enero-abril).

“En el Límite de Lima y el departamento de Junín en altitudes de entre 4000 y 5400 msnm encontramos las zonas de mesetas, lagos y lagunas (**Figura 3.6**) en donde las temperaturas varían de entre -3 y 7°C (frío muy gélido) característico de las regiones Puna⁸ y Janca⁹ o Cordillera” (Wikimedia, 2019).

3.2.3 Relieve

“Su territorio es de geografía difícil y accidentado con superficies encañonadas en muchas partes, está definido por un accidente geográfico que lo unifica y singulariza: La

⁷ “Se encuentra ubicada en los declives oriental y occidental del sistema andino y se eleva entre los 2300 y los 3500 msnm” (Kanchariq, 2017).

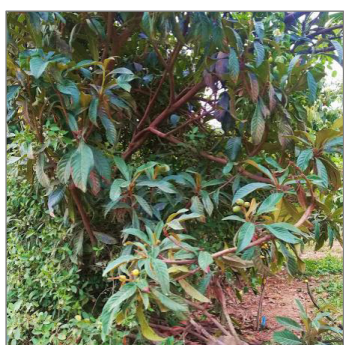
⁸ “Su ubicación va desde los 4000 metros hasta los 4800 msnm” (Kanchariq, 2017).

⁹ “Está ubicada en lo más alto del Ande. Se eleva desde los 4800 metros hasta 6768 msnm” (Kanchariq, 2017).

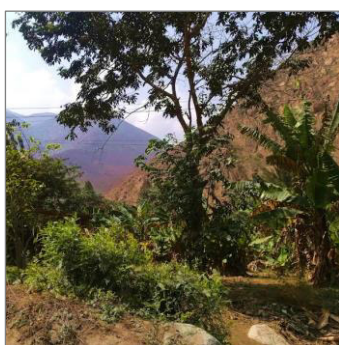
cordillera de Pariakaka, que corre larga desde el Norte de la provincia de Yauyos hasta el Sur de Ticlio (Huarochirí), mostrando dos imponentes picos cubiertos de nieve, el Pariakaka y el Monte Meigg de donde comienzan los valles de Santa Eulalia, Rímac, Lurín y Mala” según lo describe (Garcia, 2015).

3.2.4 Agricultura y Vegetación

En la parte inicial de nuestra área de estudio (Yunga) se encuentran especies frutales de producción intensiva como la Tuna, la Palta Fuerte y Chirimoya cultivadas en los distritos como Callahuanca, Santiago de Tuna, Santa Cruz de Cocachacra y San Mateo de Otao. Así también pudimos encontrar cultivos no permanentes de verduras diversas como la Col, zapallo, caigua, granada, maracuyá, membrillo, plátano y especies arbóreas como el Molle, Eucaliptos y otras especies. Cabe recalcar que a más altura se puede encontrar gran explotación de la crianza de truchas con el sistema de criaderos o piscigranjas.



a)



b)



c)

Figura 3.2 Especies arbóreas: a) Árbol de membrillo, b) Plantaciones de plátanos, c) Árboles de granada. (Fuente: Elaboración propia).

Mientras se va subiendo a la región Quechua las actividades económicas viran a la ganadería con el sistema de estancias que se explotan por medio del pastoreo. “Los ganados de crianza son básicamente los ovinos, los vacunos y las llamas en la región puna”. “En la agricultura en las alturas de nuestra zona de estudio por tratarse de una zona fría, se producen papas (cultivo predominante), maíz, habas, trigo, etc” (Wikimedia, 2019). También es indispensable mencionar que la cobertura vegetal silvestre en estas zonas las conforma los pastizales de Ichu, una planta muy común en la región puna y cordillera.



a)



b)



c)

Figura 3.3 Vegetación en la región fría: a) Papas, b) Maíz, c) Ichu.



Figura 3.4 Zona de huaicos en la yunga Marítima, quebrada Pedregal – Chosica (Fuente: Peruland)



Figura 3.5 San Jerónimo de Surco en la región Quechua (Fuente: Elaboración propia)



Figura 3.6 Ticlio o Abra de Antícona en Huarochirí pertenece a la región Puna (Fuente: El Comercio).

4. Cálculos, Métodos y Materiales

4.1 Evaluación de la Erosión utilizando los SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son estructuras físicas, lógicas y organizacionales, con objetivos específicos que posibilitan la modelización de la realidad creando imágenes abstractas de una realidad más compleja permitiendo su estudio, análisis y gestión (Rodríguez, 2008)

Los SIG procesan y tratan base de datos bastante amplias en la representación de áreas extensas de terreno caracterizadas por mucha información tanto cuantitativa como cualitativamente, esto dignifica que la información almacenada está geográficamente referenciada (mapas, estadística, datos vectoriales y demás) (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2007)

En esta investigación se utilizaron los SIG para modelar la erosión hídrica mediante mapas temáticos, los cuales son representados por una amplia base de datos y unidades de

representativas llamados pixels, estas unidades debidamente geo referenciadas y distribuidas contienen los valores necesarios que utilizamos para aplicar la ecuación RUSLE en toda nuestra área de estudio.

4.2 Aplicación del Modelo (RUSLE)

4.2.1 Obtención del Factor Climático, Erosividad (Factor R).

La base de datos de precipitación pluvial se genera en forma discreta utilizando el pluviómetro y en forma continua con un fluviógrafo. Así en este caso se utilizaron las lecturas tomadas de los pluviómetros de precipitaciones acumuladas en 24 horas y representadas en acumuladas por mes (**ANEXO B**).

La precipitación histórica utilizada se descargó de la base de datos libre del Servicio Nacional de Meteorología¹⁰ (SENAMHI, Web: <https://goo.gl/E8en4x>) y las estaciones elegidas fueron las que se encontraban dentro del área de la cuenca en estudio preferentemente. Estas estaciones meteorológicas e hidrológicas se encuentran en operación a la fecha y sus datos fueron sometidos a un proceso de calidad y consistencia para evitar valores atípicos y quiebres temporales de precipitación, este proceso de control de calidad se realizó utilizando

¹⁰ “A partir del jueves 22 de setiembre del 2016, **SENAMHI** puso a disposición de la ciudadanía información con control de calidad de datos diarios de temperatura máxima y mínima, así como precipitación de 370 estaciones meteorológicas a nivel nacional seleccionadas por la calidad de su información” (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2016) (<https://goo.gl/e45c45>).

metodologías adecuadas como las sugeridas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y diversos especialistas.

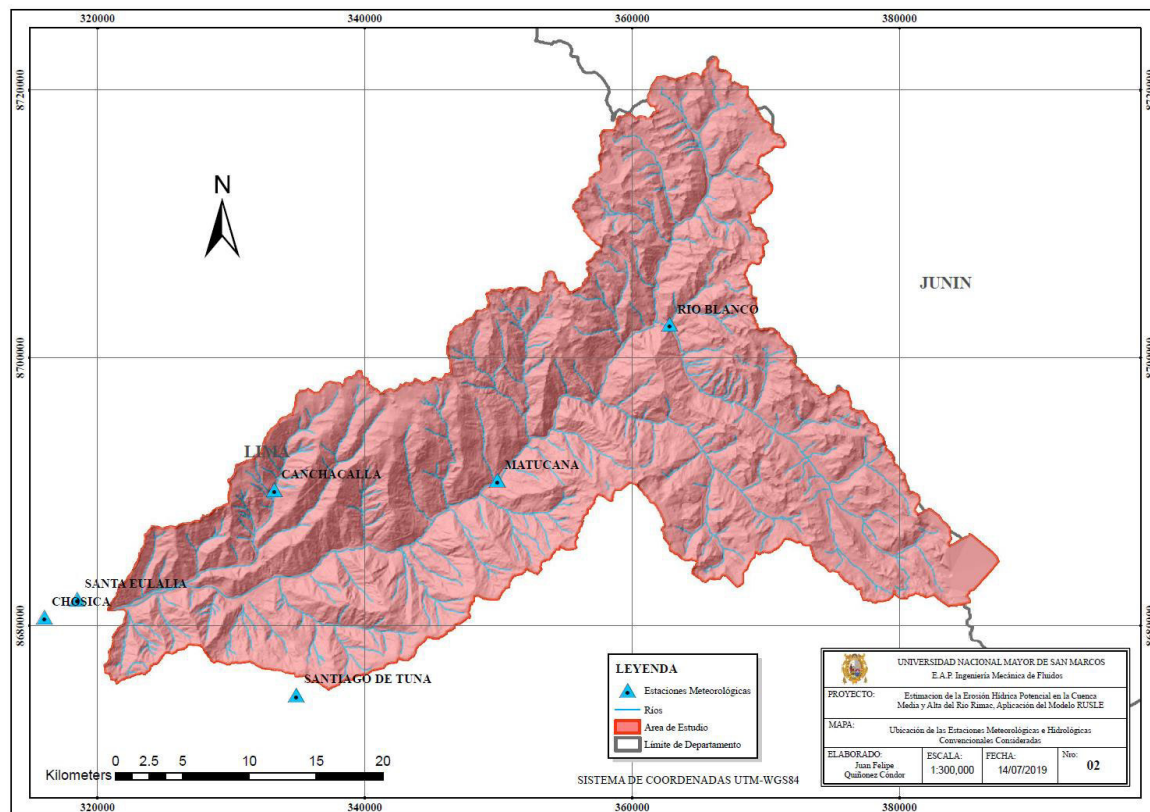


Figura 4.1 Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas Convencionales Consideradas (Fuente: Elaboración propia.)

Para encontrar los valores distribuidos del factor R se utilizó la precipitación mensual acumulada en un periodo de tiempo de 28 años¹¹ (1990-2017), de seis estaciones meteorológicas e hidrológicas convencionales instalas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) e inventariadas en el siguiente cuadro (**Tabla 4.1**).

¹¹ Se seleccionó 28 años de registro como periodo de evaluación para esta investigación por el hecho de que al elegir (por simple inspección y en un gráfico de barras) periodos más prolongados, estos no presentaban un periodo de registro óptimo, según recomendación de la **Organización Meteorológica Mundial**.

Estación	Tipo	Provincia	Distrito	ESTE	NORTE	Altitud (msnm)
RIO BLANCO	Convencional-Met.	HRÍ.	CHICLA	362816.00	8702495.00	3350
MATUCANA	Automática-Met.	HRÍ.	MATUCANA	349890.00	8690867.00	2479
CANCHACALLA	Convencional-Met.	HRÍ.	SAN MATEO DE OTAO	333184.00	8690150.00	2400
SANTA EULALIA	Convencional-Met.	HRÍ.	SANTA EULALIA	318478.00	8681965.00	934
SANTIAGO DE TUNA	Convencional-Met.	HRÍ.	SANTIAGO DE TUNA	334869.00	8674835.00	2921
CHOSICA	Convencional-Met.	LIMA	LURIGANCHO	315992.00	8680641.00	906

Tabla 4.1 Descripción de las estaciones consideradas (Fuente: Elaboración Propia)

Los datos de precipitación histórica a nivel mensual de las estaciones señaladas se encuentran en el **ANEXO B**.

ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

El estudio del comportamiento estadístico de los datos y el manejo del mismo, es posible siempre y cuando esta información obtenida de las estaciones de registro, cumpla con ser completa, consistente y de suficiente extensión. Es así que antes de la utilización de estos datos se le debe revisar en estos 3 aspectos.

1. Análisis de consistencia visual

En coordenadas cartesianas se ploteó la información hidrológica histórica, ubicándose en las ordenadas, los valores de la serie (precipitación) y en las abscisas el tiempo (años, meses, días, etc). Este análisis sirve para tener una primera aproximación de la veracidad y fiabilidad de la información para luego analizar utilizando doble masa. (**ANEXO H**).



Gráfico 4.1 Análisis visual de 28 años de precipitación histórica (Elaboración Propia).

2. Análisis de consistencia Doble Masa

Completamos los meses faltantes con el promedio mensual multianual para cada estación, esto es válido para fines de un análisis de consistencia de doble masa de la información obtenida¹².

Periodos confiables y dudosos son los que nos indicará este análisis doble masa en cada estación de estudio.

En esta parte se agruparon las estaciones cercanas en distancia y altura, entre ellas se seleccionaron las estaciones con la información más confiables (estación base o índice) de cada grupo, dicha estación sirvió para compararla con las demás de su grupo.

Para la selección de la estación índice planteamos en eje de las abscisas el promedio anual acumulado de las estaciones del grupo y en eje de las ordenadas las estaciones en estudio (**Anexo H**).

¹² Proyecto Puyango Tumbes – ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE SERIES HIDROMETEOROLÓGICAS Pag. 8 / UNALM

De estos doble masa se selecciona como la estación más confiable, la que presenta menor número de quiebres.

Seguidamente con la estación índice que es la más confiable, se construye el mismo diagrama colocando en las abscisas la estación índice y en la estación a estudiar en el eje de las ordenadas, tal como se muestra en el siguiente gráfico (Gráfico 4.2).

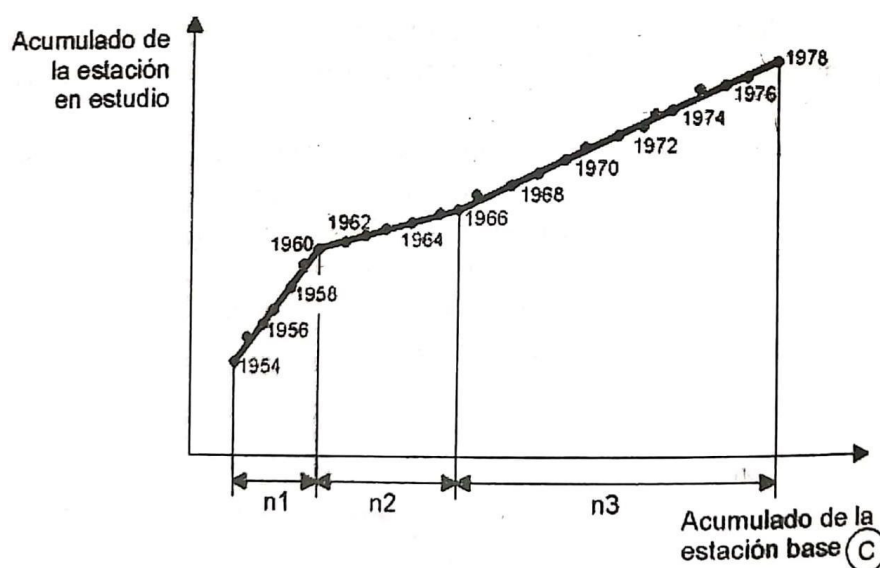


Gráfico 4.2 Análisis doble masa para obtener los periodos dudosos mediante los quiebres n_1 , n_2 y n_3 (Villón Béjar, 2016).

Este último análisis permite determinar el rango de periodos dudosos y confiables para cada estación en estudio, la cual se deberá corregir utilizando ciertos criterios estadísticos.

3. Completación de datos faltantes

La completación de datos, es el proceso por el cual, se llenan “huecos” que existen en un registro de datos. En esta parte se utilizó el método de regresión lineal simple que en general es el modelo matemático más usado para transferir información hidrológica, entre estaciones medidas. El desarrollo de la misa se encontrará en el **ANEXO H**.

4. Análisis estadístico

“Una vez obtenidos los periodos de posibles correcciones de los datos, lo que implica un periodo de datos que se mantendrán con sus valores originales (esto en base a la decisión técnica de que periodo se mantendrá con los datos originales y cuales se modificarán), se procede a analizarlos estadísticamente tanto en la media como en la desviación estándar, para ver si sus valores están dentro del rango permisible para un cierto nivel de significación según la hipótesis planteada” según lo explica (Aliaga Araujo & De Piérola Canales, 1978).

La forma con la cual se desarrolló el análisis estadístico se encuentra en el **ANEXO H**.

Se utilizó la siguiente relación empírica (4.1) desarrollada por (Wischmeier & Smith, 1978) para calcular este índice, que además ha sido aplicada en diversos estudios como el hecho por (Sabino Rojas, 2016) en el análisis espacio temporal de la erosión hídrica a nivel nacional¹³:

La siguiente relación desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) fue la que se aplicó:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{\left(1.5 \log \left(\frac{P_i^2}{P} \right) - 0.08188 \right)} \quad (4.1)$$

Donde:

R = “es el factor de erosividad” ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot año^{-1}$)

P_i = “precipitación mensual en mm”

P = “precipitación anual en mm”

¹³ Análisis espacio - temporal de erosión de suelos por regiones hidrológicas en el Perú (1981 - 2014) Evelin Daysi Sabino – UNMSM 2016.

Este modelo muestra un buen comportamiento con tormentas mensuales regularmente intensas, así como también para tormentas de mediana intensidad, dando pie a la hipótesis de que estas tormentas son las más erosivas a nivel de cuenca.

Finalmente, para la distribución espacial del factor R se utilizaron los datos multianuales (28 años) de dicho factor en cada estación. El método de interpolación para esta distribución fue el de Kriging debido a su uso en aplicaciones geoestadísticas y su elaborado análisis.

4.2.2 Obtención del factor suelo (K).

Este factor representa la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. Su valor depende del contenido de materia orgánica, textura superficial, estructura del suelo y permeabilidad. Se trata de un factor difícil de obtener ya que demanda un trabajo intenso en campo y elevado coste; normalmente se determina utilizando tablas o nomogramas empíricos.

Para nuestro estudio se utilizó información provista por el SoilGrids¹⁴, en la actualidad, SoilGrids.org de ISRIC¹⁵ ofrece una gran cantidad de mapas del mundo de propiedades y clases de suelos actualizables a resoluciones espaciales de 1km y 250m/pix.

WorldGrids - Global Environmental Layers SoilGrids, y proyectos similares se basan en el uso de productos de datos de teledetección. En el período 2012-2016, el enfoque principal

¹⁴ **SoilGrids** Es un sistema para el mapeo automatizado del suelo basado en la compilación global de datos de perfil del suelo y datos de teledetección disponibles públicamente (<https://goo.gl/acPg7m>).

¹⁵ **ISRIC** - World Soil Information, legalmente registrada como el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos, tiene la misión de servir a la comunidad internacional como custodio de la información global del suelo.

del mapeo global de suelos fueron los productos terrestres MODIS, el modelo de elevación digital SRTM y varios productos de datos climáticos. Más allá de 2017, el enfoque del mapeo global de suelos está cambiando lentamente hacia resoluciones cada vez más finas (Landsat, Aster, ALOS, satélites Sentinel).

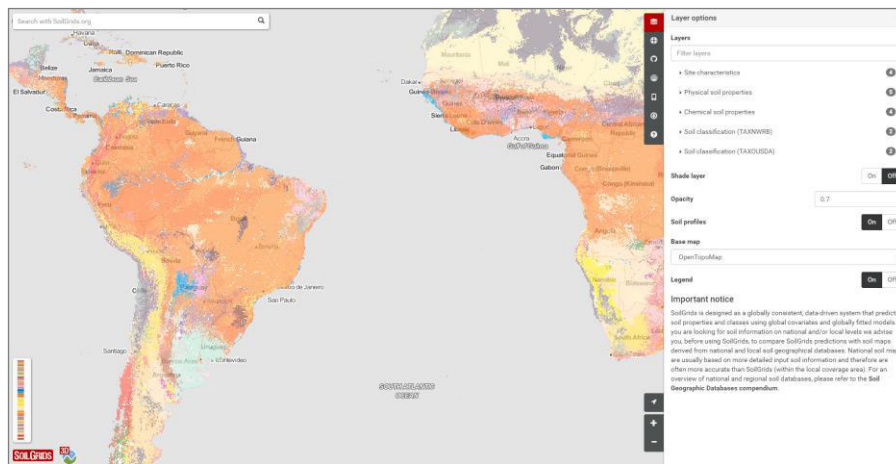


Figura 4.2 Portal de SoilGrids que proporciona datos de propiedades y clases de suelo a nivel mundial.

Se procedió de la siguiente manera.

- Para el factor K se utiliza el nomograma de Wischmeier y Smith (1978), requiriendo para ello, datos detallados. Debido a que existen muchos métodos más accesibles se tomó la decisión de emplear los datos tabulados por Kirkby y Morgan (Tabla 4.3) que necesitan de datos de clasificación textural del suelo, es así que para poder obtener una clasificación de texturas básicas del suelo según el tamaño de partícula se necesita tener porcentajes de arena, limo y arcilla distribuidos geoespacialmente del área de estudio, de esta forma se logró ubicar cada composición básica del suelo en el triángulo de clases texturales (Gráfico 2.5).

- Una vez posicionados los 12 tipos de suelos en el triángulo de clases texturales procedimos a reclasificar utilizando la **Tabla 4.2**. El método de Kirkby Morgan contiene 18 clases texturales dentro de las cuales se encuentran las 12 mencionadas anteriormente y utiliza como parámetro asociado el contenido de materia orgánica (**Tabla 4.3**). Debido a que no se encontró información geoespacial sobre contenido de materia orgánica de suelos en la zona, se asumió para el factor K, un promedio aritmético de los tres valores disponibles por cada clasificación.

Nombre de los suelos (Textura General)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural	Nro	Textura
Suelos Francos (textura moderadamente fina)	0 - 45	0 - 40	40 - 100	Arcilloso	1	Fina
	0 - 20	40 - 60	40 - 60	Arcilloso limoso	2	
	45 - 65	0 - 20	35 - 55	Arcilloso Arenoso	3	
Suelos Arcillosos (textura fina)	0 - 20	40 - 73	27 - 40	Franco Limoso Arcilloso	4	
	45 - 80	0 - 28	20 - 35	Franco Arenoso Arcilloso	5	
	20 - 45	15 - 52	27 - 40	Franco Arcilloso	6	
Suelos Francos (textura mediana)	0 - 20	88 - 100	0 - 12	Limoso	7	Media
	20 - 50	74 - 88	0 - 27	Franco Limoso	8	
	23 - 52	28 - 50	7 - 27	Franco	9	
Suelos Arenosos (textura gruesa)	86 - 100	0 - 14	0 - 10	Arenoso	10	Gruesa
	50 - 70	0 - 50	0 - 20	Franco Arenoso	11	
Suelos Francos (textura moderadamente gruesa)	70 - 86	0 - 30	0 - 15	Arenoso Franco	12	

Tabla 4.2 Tabla de clasificación textural de suelos según porcentaje de arena limo y arcilla (Sabino Rojas, 2016).

Textura	Fact. K		
	M.O. (Materia Orgánica)		
	< 0.5%	2%	> 4%
“Arena”	0.007	0.004	0.003
“Arena fina”	0.021	0.018	0.013
“Arena muy fina”	0.055	0.047	0.037
“Arena franca”	0.016	0.013	0.011
“Arena fina franca”	0.032	0.026	0.021
“Arena muy fina franca”	0.058	0.05	0.04
“Franco arenoso”	0.036	0.032	0.025
“Franco arenoso fino”	0.046	0.04	0.032
“Franco arenoso muy fino”	0.062	0.054	0.043
“Franco”	0.05	0.045	0.038
“Limo franco”	0.063	0.055	0.043
“Limo”	0.079	0.068	0.055
“Franco areno arcilloso”	0.036	0.033	0.028
“Franco arcilloso”	0.037	0.033	0.028
“Franco arcillo limoso”	0.049	0.042	0.034
“Arcilla arenosa”	0.018	0.017	0.016
“Arcilla limosa”	0.033	0.03	0.025
“Arcilla”	0.013	0.035	0.029

Tabla 4.3 Valores de K, método de Kirkby y Morgan 1980 en ($\text{ton} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

- Finalmente utilizando el método de Kirkby y Morgan, procedimos a reclasificar pixel por pixel los valores del factor K en nuestro ráster del área de estudio, obteniendo de esta forma el Mapa de Erodabilidad de Suelo.

Debemos tener en cuenta que, en las áreas de nevados permanentes, lagunas y cursos de agua el factor K será se asumió como “0” ya que estas áreas no son productores potenciales de sedimentos en cuanto al fenómeno de erosión hídrica se trata.

4.2.3 Obtención del factor relieve (LS).

La topografía y el relieve del terreno contribuyen a la erosión del suelo en nuestro estudio con dos factores, estos son los factores LS (factor longitud y pendiente respectivamente) (Renard & Foster, 1997).

La metodología que se utilizó para hallar este factor fue la siguiente.

- Contamos con múltiples herramientas de obtención de un DEM asociadas a la información satelital libre de entidades públicas nacionales como el IGN e internacionales como la NASA. Si bien es cierto se puede trabajar con esta información disponible, se optó por utilizar el producto SRTM¹⁶ (Shuttle Radar Topography Mission).
- Se obtuvo la información para el Modelo Digital de Elevaciones del producto del SRTM alojado en la página del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), estos son rasters de resolución 30m en formato TIFF, seguidamente se utilizó la plataforma Arc Map para procesar el DEM de nuestra zona de estudio.
- Generamos el mapa de pendientes para comenzar a reclasificar los valores del sub factor “m” según la **Tabla 2.4** y posteriormente hallar el factor L utilizando la ecuación (**2.8**), todo esto teniendo en cuenta la longitud “x” (longitud de la pendiente), el cual tendrá un valor constante de 30m (resolución de cada pixel).

¹⁶ Se optó por este medio debido a su recurrente uso en hidrología y buena precisión.

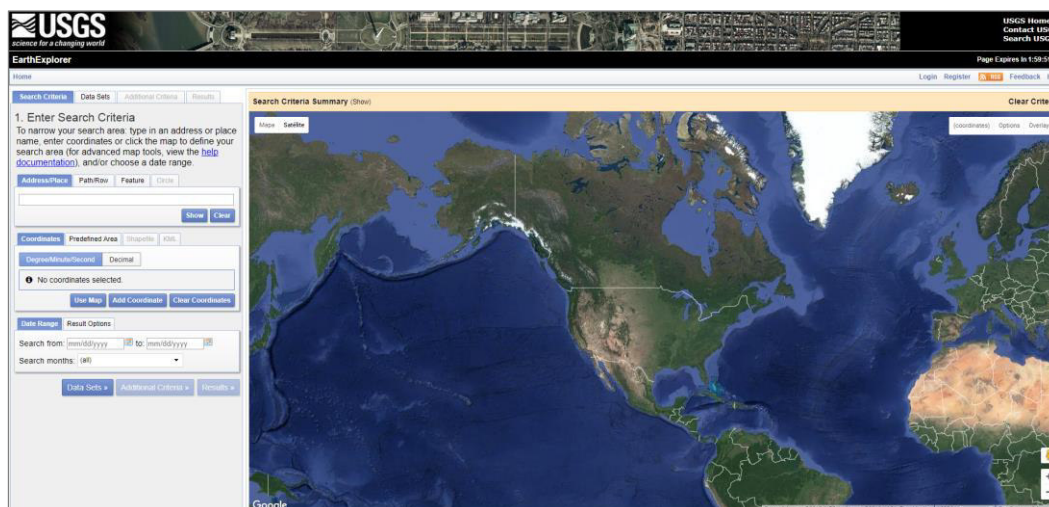


Gráfico 4.3 Portal del USGS para la descarga de Modelos Digitales de Elevación DEM.

4.2.4 Obtención del factor de cobertura vegetal (C).

Este factor representa el potencial de amortiguamiento contra la energía de impacto de la lluvia y a la fuerza erosiva de flujo superficial. “Este factor es constante para cultivos permanentes y variable para cultivos anuales” (Wischmeier & Smith, 1978). En esta investigación se utilizó el factor C de forma permanente para un año en específico ya que la información de cobertura es anual.

En el modelo RUSLE el factor C es un parámetro clasificado para diferentes tipos de cobertura vegetal y está presente en tablas a partir de determinados valores de parámetros relacionados.

Para la obtención del factor C se usó la siguiente metodología.

- Se obtuvieron las imágenes satelitales para la clasificación de la cobertura vegetal del satélite LandSat8 OLI/TIRS C1 Level 1 de Land Viewer (<https://eos.com>) del 12 de octubre del 2015 a una resolución de 30 m/pix.

- Se realizó una clasificación supervisada de nueve tipos de cobertura vegetal incluyendo suelos con cobertura de bosques espesos y suelos sin cobertura.
- Se le asignó a cada clase de cobertura un valor de C obtenido de trabajos de investigación realizados en el distrito de Padre Abad, departamento de Ucayali en nuestro país Perú¹⁷.

Código	USO Y COBERTURA	FACTOR C
1C	Suelo rocoso desnudo	0.0070
2C	Bofedales y cuerpos de agua	0.0001
3C	Áreas agrícolas	0.2356
4C	Suelo desnudo	0.9900
5C	Centro Minero	0.0000
6C	Cultivos permanentes y semipermanentes	0.4350
7C	Vegetación y pastos naturales	0.0394
8C	Bosque denso	0.0047
9C	Tejido urbano	0.0093

Tabla 4.4 Correspondencia del Factor C para cada tipo de cobertura encontrada en el área de estudio (Flores Villanueva & De Lara Suárez, 2015).

¹⁷ Trabajo de investigación realizado por el Ing. Angel Leonardo Flores Villanueva y el Ing. Lucio Manrique De Lara Suárez en la subcuenca Shambillo, distrito de Padre Abad en el departamento de Ucayali.

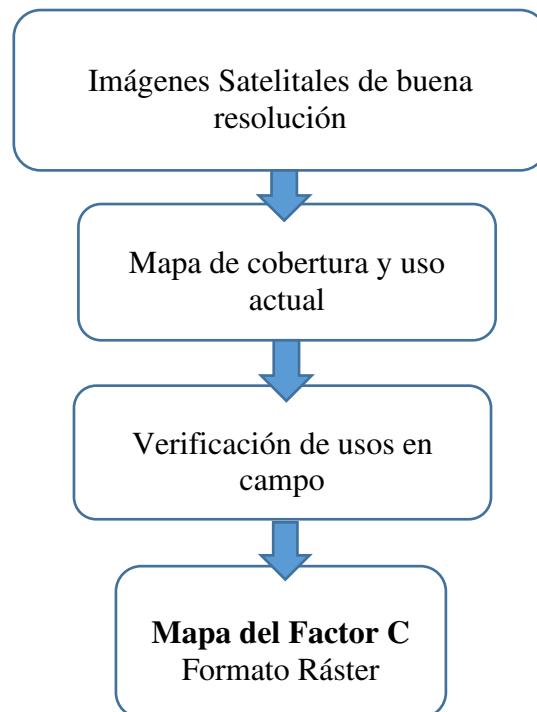
Diagrama de flujo de toma de datos para el factor C

Gráfico 4.4 Diagrama de flujo para una correcta determinación del factor C.

Finalmente se ajustaron los valores del factor C o cobertura vegetal mediante visitas a campo, las cuales nos dieron certeza de las especies arbóreas, cultivos y usos del suelo de nuestra área de estudio (Ver **ANEXO F**).

4.2.5 Obtención del factor prácticas de conservación (P).

El factor P se utiliza para describir la variabilidad del potencial erosivo en una parcela en donde se han realizado practicas mecánicas de conservación de suelos y una parcela en donde dichas prácticas no se hayan realizado.

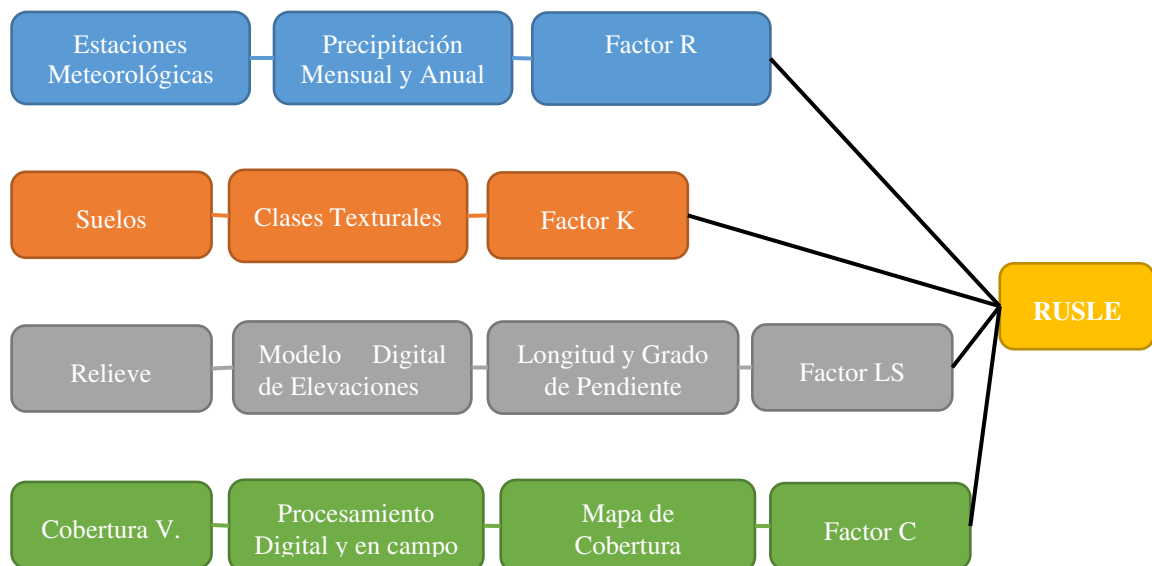
Para obtener el Factor P se utilizaría la siguiente metodología.

- Utilizando un mapa temático de pendiente y distribución geográfica de prácticas de conservación, se realizaría una distribución espacial de la pendientes y áreas de aplicación.
- Realizando una reclasificación raster del tipo de prácticas de conservación aplicados, se podría determinar el factor P según la **Tabla 4.5** y obtener el Mapa de “Prácticas de Conservación de Suelos”.

“Pendiente” %	“Cultivo a Nivel”	“Cultivo en Faja”	“Cultivo en Terraza”
1 - 2	0.60	0.30	0.12
3 - 8	0.50	0.25	0.10
9 - 12	0.60	0.30	0.12
13 - 16	0.70	0.35	0.14
17 - 20	0.80	0.40	0.16
21 - 25	0.90	0.45	0.18

Tabla 4.5 factor de conservación de suelos para tipos de cultivo a diferentes niveles de pendiente (fact. P), (Wischmeier & Smith, 1978).

4.2.6 Esquema Metodológico o Diagrama de Flujo del RUSLE.



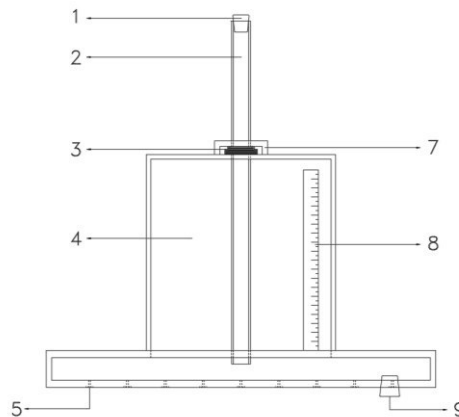
4.3 Simulador Físico de Lluvia

4.3.1 Descripción de las partes

Este simulador está compuesto de la siguiente manera (**Figura 4.3**):

- 1) Tapón del tubo aireador
- 2) Tubo aireador de PVC (aumento o disminución de presión)
- 3) Empaquetadura de unión del tubo aireador y el tanque contenedor de agua.
- 4) Tanque contenedor de agua (capacidad aprox. 13 L)
- 5) Capilares distribuidos uniformemente (81 capilares)
- 6) Material acrílico de dos espesores
- 7) Protector de empaquetadura impermeabilizante
- 8) Regleta graduada para controlar niveles de agua

9) Tapón sellador de tanque contenedor

**Figura 4.3** Partes esquematizadas del simulador (Monge Jeremías & Aguilar Pereira, 2008)**4.3.2 Especificaciones técnicas del Simulador**

En la siguiente tabla se encuentran las principales características técnicas del simulador utilizado en este trabajo de investigación:

Área de prueba	0.1600 m ²
Distancia lateral	432 mm
Dimensiones prisma superior	20*20*22cm
Dimensiones prisma inferior	42*42*2.5 cm
Contenido total (volumen)	13.21 L
Contenido efectivo (volumen) máx. intensidad	7.6 L
Contenido efectivo (volumen) min. intensidad	10.65 L
Número total de capilares	81
Largo de capilares	8 mm
Diámetro interno y externo de capilares	2 y 7 mm, respectivamente

Debemos mencionar que, dada la cantidad de capilares, estos pueden ser regulados con diferentes intensidades según el movimiento del tubo aireador, para lo cual se deberá calibrar la intensidad requerida para los ensayos.

El simulador debe ser utilizado en un rango de pendiente desde 0% hasta los 60% siendo este el límite máximo permisible para condiciones óptimas de funcionamiento.

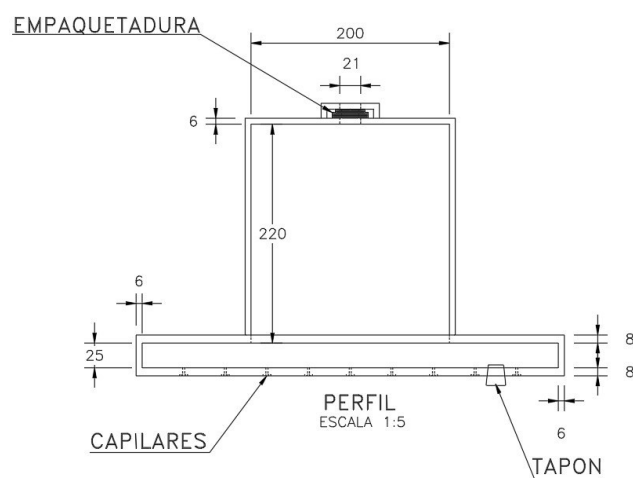


Figura 4.4 Dimensiones y vista de perfil de la regadera (Elaboración propia).

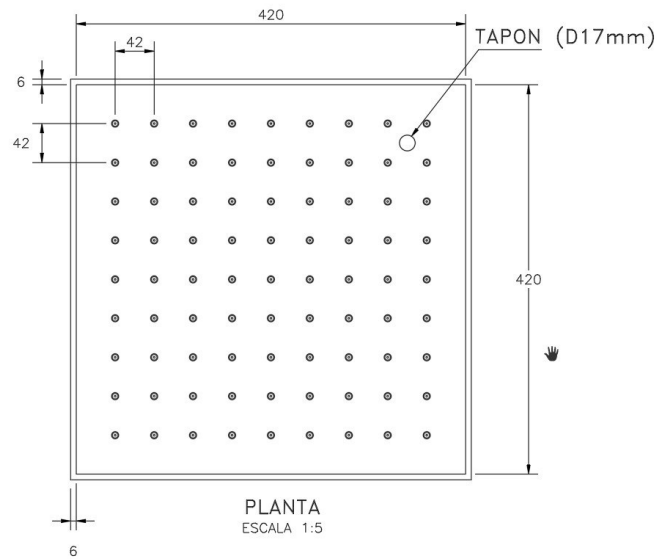


Figura 4.5 Vista de planta inferior de la regadera (Elaboración propia).

4.3.3 Calibración

Para encontrar el rango de descarga constante y que los capilares puedan actuar sin obstrucciones, es imprescindible calibrar antes del ensayo en campo, y esta calibración se realiza en un área de prueba que solo se usará una vez.

Procedimiento para el llenado del simulador:

- Se procederá a anclar las láminas de metal al terreno en elección.
- Procedemos a instalar los soportes ajustables al terreno.
- En todo momento el tubo de aireación deberá estar cerrado con su tapón.
- El tanque contenedor se coloca invertido en el soporte.
- Quitamos el tapón del tanque para comenzar con el llenado del mismo.
- Procedemos al llenado del tanque contenedor con el agua almacenada en un bidón o galonera grande.

- g. Se volteó el tanque una vez terminado el llenado.
- h. Utilizamos el tubo de aireación para un ajuste de la intensidad requerida de modo que mientras más arriba esté el tubo de aireación mayor será la intensidad de lluvia que se aplicará.
- i. Antes de iniciar el ensayo se verifica el funcionamiento del cronómetro y se mide la altura inicial del agua en el tanque contenedor.
- j. Quitamos el tapón del tubo aireador para comenzar la simulación.
- k. Una vez haya transcurrido el tiempo definido se volverá a tapar el tubo aireador para detener la simulación
- l. Finalmente anotaremos el nivel al cual quedó el agua en el tanque.

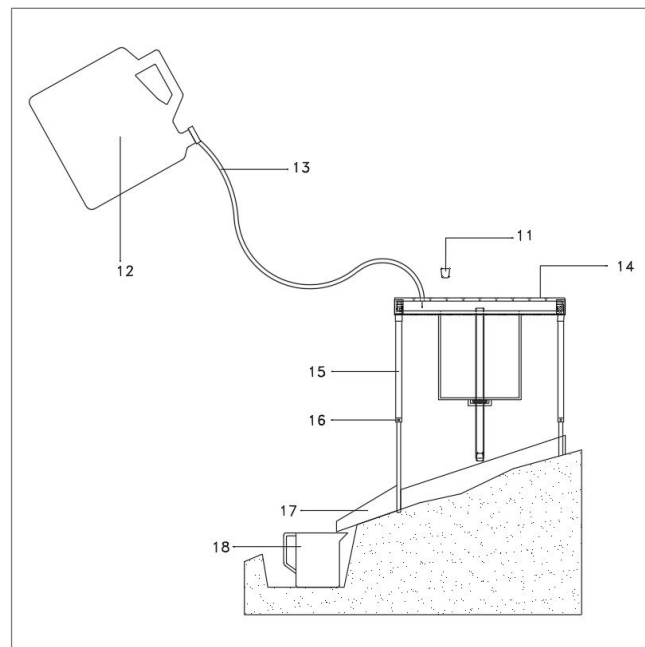


Figura 4.6 Indicación de llenado del tanque (Fuente: Elaboración propia).

4.3.4 Instalación en Campo

Se siguió el siguiente procedimiento para comenzar la simulación.

1. Seleccionamos el área adecuada con las características requeridas.
2. Una vez situada la primera parte del simulador, pasaremos a construir el espacio para el recolector de sedimentos en la parte baja.
3. Se procedió con el soporte ajustable y las láminas que delimitarán el área a simular.
4. Debemos asegurarnos de que las láminas o canaletas delimiten de manera efectiva nuestra zona de simulación, se podría utilizar arcilla u otro material cohesivo impermeabilizante.





Figura 4.7 Pasos para la instalación del equipo (Fuente: Elaboración propia)

4.3.5 Operación del Simulador

En esta parte de la operación del simulador se tomarán las mismas consideraciones y pasos que en el de la calibración haciendo énfasis en algunas recomendaciones extras como:

1. Se recomienda la utilización de una manguera para el llenado del tanque contenedor.
2. Revisar el buen funcionamiento del cronómetro y las medidas iniciales de altura para cada ensayo.



Figura 4.8 Llenado y puesta en marcha del ensayo en campo (Fuente: Elaboración Propia).

3. Ya iniciada la simulación nos aseguraremos de la salida uniforme de las gotas moviendo el tanque contenedor de forma horizontal sin causar mucha perturbación.
4. Para prevenir que el viento interfiera con la caída vertical de las gotas, en la mayoría de los casos es suficiente colocarse uno mismo entre el aparato y la dirección del viento o sino colocar alguna pantalla o plástico para minimizar este efecto.
5. Debemos asegurarnos que todo el sedimento atrapado en la canaleta saliente sea vertido en la muestra recolectada.
6. Se recolectan las muestras por ensayo en recipientes debidamente codificados y herméticos para su transporte. Seguidamente se lleva al laboratorio, donde la cantidad de sedimento desplazado será determinado por peso y secado (en 24 horas a 105°C).



Figura 4.9 Inicio y final de la simulación (Fuente: Elaboración propia)

Cuando se realizaron las simulaciones de lluvia en campo, se tuvo que contar con un personal de apoyo para poder realizar el volteo del contenedor de agua, así como también el llenado, el vaciado y la toma de datos. Tener estas consideraciones ayudarán a obtener resultados más precisos en la simulación.

4.4 Materiales

4.4.1 Equipos y materiales de Campo

EQUIPOS

- ✓ Simulador de Lluvia
- ✓ GPS (Navegador)
- ✓ Calculadora científica
- ✓ Plástico (2 metros lineales a más)
- ✓ Cámara fotográfica digital

MATERIALES

- ✓ Simulador de Lluvia
- ✓ Libreta de campo
- ✓ Embudo
- ✓ Martillo de metal y de goma
- ✓ Jarra plástica (de 2L aproximadamente)
- ✓ Balde plástico (pequeño)
- ✓ Contenedores de agua o botellas (2 litros a más)
- ✓ Nivel de burbuja
- ✓ Etiquetas adheribles
- ✓ Pico y Lampa
- ✓ Termómetro
- ✓ Cinta Masking Tape

4.4.2 Materiales de Gabinete

- ✓ Computadora (Laptop o Desktop)
- ✓ Impresora y Plotter
- ✓ Lápiz y lapicero
- ✓ Cuadernos de apuntes
- ✓ Hojas bond A4

4.4.3 Materiales de Laboratorio

- ✓ Guantes
- ✓ Balanza electrónica
- ✓ Horno para secado de muestras
- ✓ Bandeja de aluminio
- ✓ Cuaderno de notas

4.4.4 Software

- ❖ Google Earth: Geolocalización del trabajo, cobertura vegetal y ubicación.
- ❖ ArcMap 10.2: Procesamiento, generación y cálculos de mapas ráster.
- ❖ ERDAS: Clasificación Supervisada de coberturas vegetales.
- ❖ Civil 3D: Generación de superficies y diseño de equipo 3D.
- ❖ AUTOCAD: Generación de planos de diseño y vistas 2D.
- ❖ Microsoft Excel: Cálculos matriciales, probabilísticos y ordenamiento de tablas.
- ❖ Microsoft Word: Redacción de la tesis y generación de informes de campo.

4.5 Simulación Física de Lluvia

4.5.1 Ubicación

Para efectuar el trabajo de simulación dentro de nuestra área de estudio fue necesario optar por una metodología adecuada para identificar aquellas áreas en donde la pendiente y demás parámetros de simulación fueron los más accesibles y seguros, ya que este factor en el trabajo de campo es esencialmente necesario.

4.5.2 Puntos de simulación (zonas de simulación)

Así como para el modelamiento utilizando RUSLE, la simulación en campo se realizó tomando en cuenta información secundaria obtenida para esta investigación.

Determinamos un total de 6 zonas de simulación en nuestra área de estudio. La elección de estas zonas se hizo mediante un análisis entre las características de campo involucradas en el modelamiento. Estas características son:

- Información de precipitación histórica obtenida de la base de datos del SENAMHI.
- Características de susceptibilidad a erosión del suelo (factor K).
- El mapa de cobertura vegetal a una escala adecuada (factor C).
- Y finalmente el modelo digital de elevaciones para delimitar pendientes moderadas en donde pudimos realizar adecuadamente la simulación (factor LS).

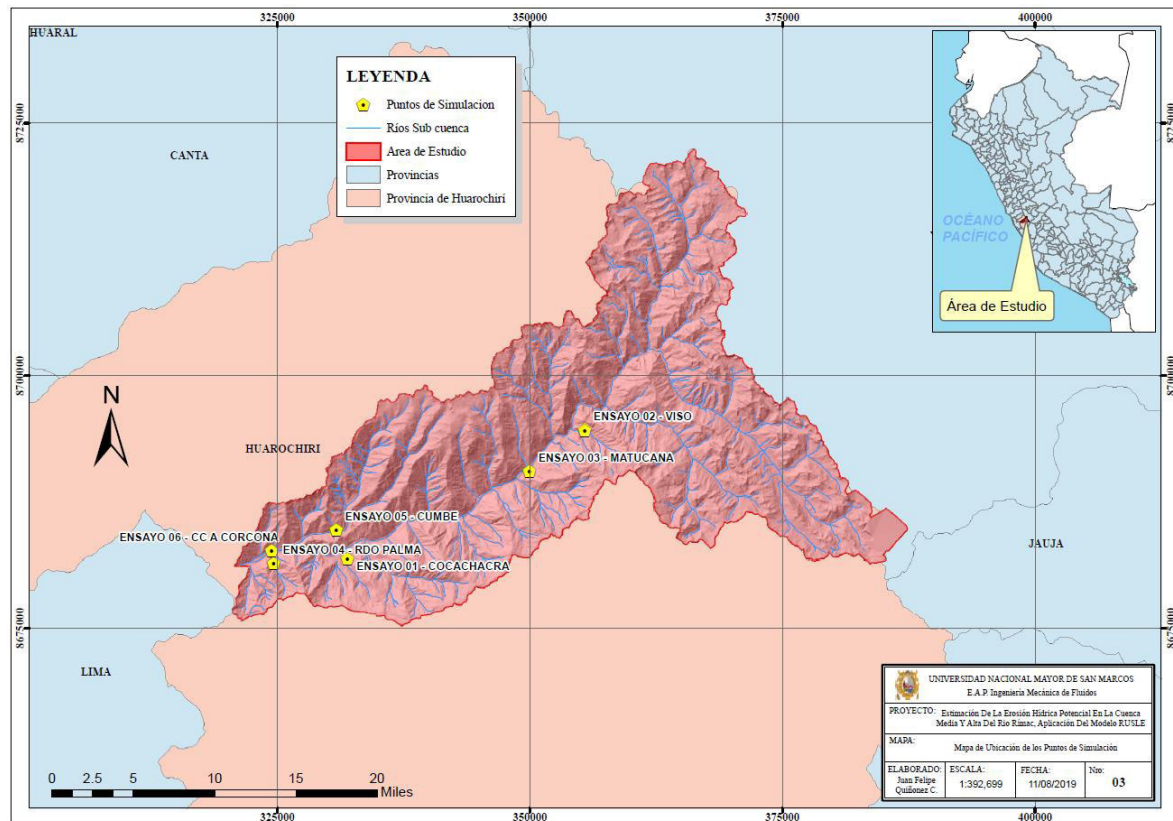


Figura 4.10 Mapa de los puntos donde se realizaron las simulaciones en campo.

En el siguiente cuadro se muestran las coordenadas en donde se realizaron los ensayos con el simulador de lluvia (**Tabla 4.6**).

Nro.	Código	Distrito	Este	Norte	Altitud
1	PC010604	Santa Cruz de Cocachacra	331938	8681893	1489
2	PC022104	San Mateo	355428	8694609	3096
3	PC032104	Matucana	349961	8690545	2495
4	PC042104	Ricardo Palma	324651	8681444	1270
5	PC052204	San Mateo de Otao - Cumbe	330822	8684713	1667
6	PC062204	Ricardo Palma	324431	8682669	1152

Tabla 4.6 Ubicación de puntos de simulación - WGS_84 UTM 18S.

La ubicación exacta y las condiciones en las que se llevaron a cabo los ensayos se muestran en el **ANEXO G**.



Figura 4.11 Simulación en el distrito de San Mateo de Otao.

4.5.3 Generación de erosión Simulada

Se procedió de la siguiente manera:

Se realizó la calibración del equipo simulador de lluvia con una intensidad que varía en el rango de 4.4 mm/min hasta 8.3 mm/min, con una altura de tubo aireador estándar para todas las simulaciones realizadas.

Ya instalado el equipo en campo siguiendo los protocolos indicados en el manual descrito anteriormente, se procede a operar el equipo con diferentes cantidades de precipitación y por ende diferente duración de ejecución para cada punto evaluado. Se debe tener en cuenta que los únicos parámetros o condiciones que elegimos en campo fueron los que corresponden al “factor LS” (factor topográfico) y “factor C” (factor de cobertura vegetal) ya que el factor K

(Factor de Erodabilidad), se determinó a partir de la información rasterizada obtenida para el modelamiento con SIG.

Se realizaron dos ensayos o simulaciones cercanas en cada punto elegido para obtener una media más representativa de dicho punto de evaluación. Estas muestras obtenidas fueron llevadas al laboratorio para su secado y pesado.

Nro	Clasificación de Pendiente	Cobertura veg. (Campo)	Precipitación T. (mm)	Peso seco 1er (gr)	Peso seco 2do (gr)	Promedio (gr)
1	15% - 30%	Vegetación natural	40.0	3.0	2.3	2.7
2	30% - 60%	V. natural - húmeda	21.8	3.5	3.0	3.2
3	30% - 60%	Suelo descubierto	23.8	175.5	130.2	152.9
4	15% - 30%	Seco - pedregoso	26.3	14.0	9.5	11.8
5	15% - 30%	Bosque denso	41.3	5.1	3.5	4.3
6	15% - 30%	Cultivo estacional	38.8	71.5	63.0	67.3

Tabla 4.7 Precipitación total aplicada y cantidad de sedimento obtenido por simulación.

5. Post Proceso, Análisis y Resultados

5.1 Erosión Hídrica Modelada (RUSLE)

5.1.1 Erosividad - Factor R

Según el procedimiento planteado en el subcapítulo 4.2.1, se utilizó la precipitación mensual y la acumulada anual para estimar el grado de erosividad (factor R) en toda nuestra área de estudio según los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas es cuestión (ANEXO C). Se consideró confiable la relación existente entre la precipitación mensual y los valores del índice de erosividad por alta asociación ($R^2=0.82$) así como también lo muestra en su investigación (Sabino Rojas, 2016).

A continuación, se muestran los siguientes índices de erosividad que se obtuvieron para cada estación considerada en el año 2015 **Tabla 5.1**.

Estación	Provincia	Distrito	Altitud (m)	R (MJ.mm)/(ha.hr.año)
RIO BLANCO	HRÍ.	CHICLA	3350	508.855389
MATUCANA	HRÍ.	MATUCANA	2479	1053.565019
CHOSICA	LIMA	LURIGANCHO	906	128.602757
SANTA EULALIA	HRÍ.	SANTA EULALIA	934	197.7976777
CANCHACALLA	HRÍ.	SAN MATEO DE OTAO	2400	1526.909165
SANTIAGO DE TUNA	HRÍ.	SANTIAGO DE TUNA	2921	1947.765019

Tabla 5.1 Factor R para la cuenca media-alta del río Rímac para el año 2015, donde MJ: Mega Joules
(Fuente: Elaboración propia).

Con el factor R obtenido en cada estación realizamos una interpolación (Kriging) para observar la distribución de dicho factor a lo largo de toda nuestra área de estudio.

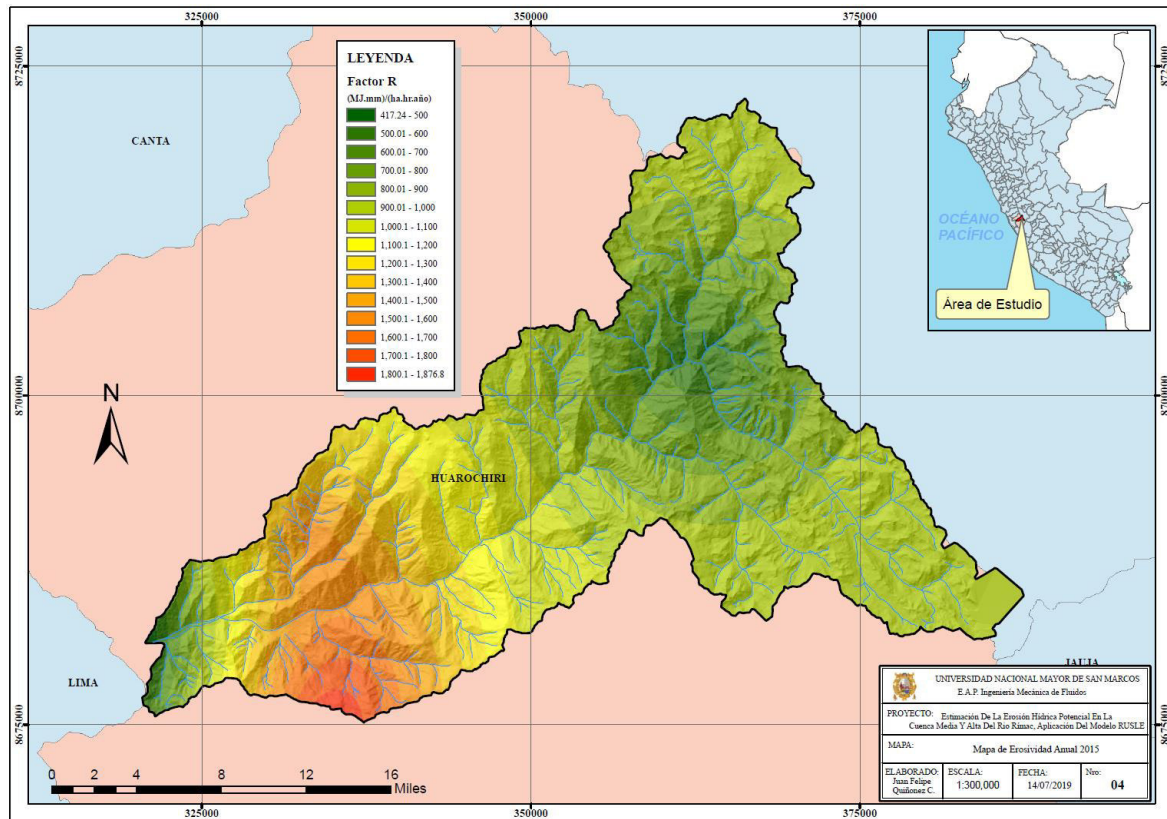


Figura 5.1 Mapa de Erosividad – Factor R (2015).

Después de distribuir el índice de erosividad (factor R) en toda nuestra cuenca y haber procesado los datos mediante la metodología planteada utilizando la precipitación mensual y anual se obtuvieron valores del factor R de entre 417.24 y 1876.8 (MJ.mm)/(ha.hr.año), valores que no se alejan de países de América Latina como Costa Rica con valores de R de entre 500 y 1865 (MJ.mm)/(ha.hr.año), República Dominicana entre 100 y 1800 (MJ.mm)/(ha.hr.año), Puerto Rico con valores de entre 600 y 800 (MJ.mm)/(ha.hr.año) según (Morales, 2014) y Perú.

5.1.2 Erodabilidad - Factor K

Para hallar el Factor K, se utilizó el Diagrama Triangular de Clases Texturales. Este análisis se realizó identificando cada clase textural según el contenido de arena, limo y arcilla (en forma porcentual %) del suelo de las áreas localizadas de toda nuestra cuenca. Finalmente, se le asignó un valor de K a cada clase textural utilizando la metodología de Kirkby y Morgan **Tabla 4.3.**

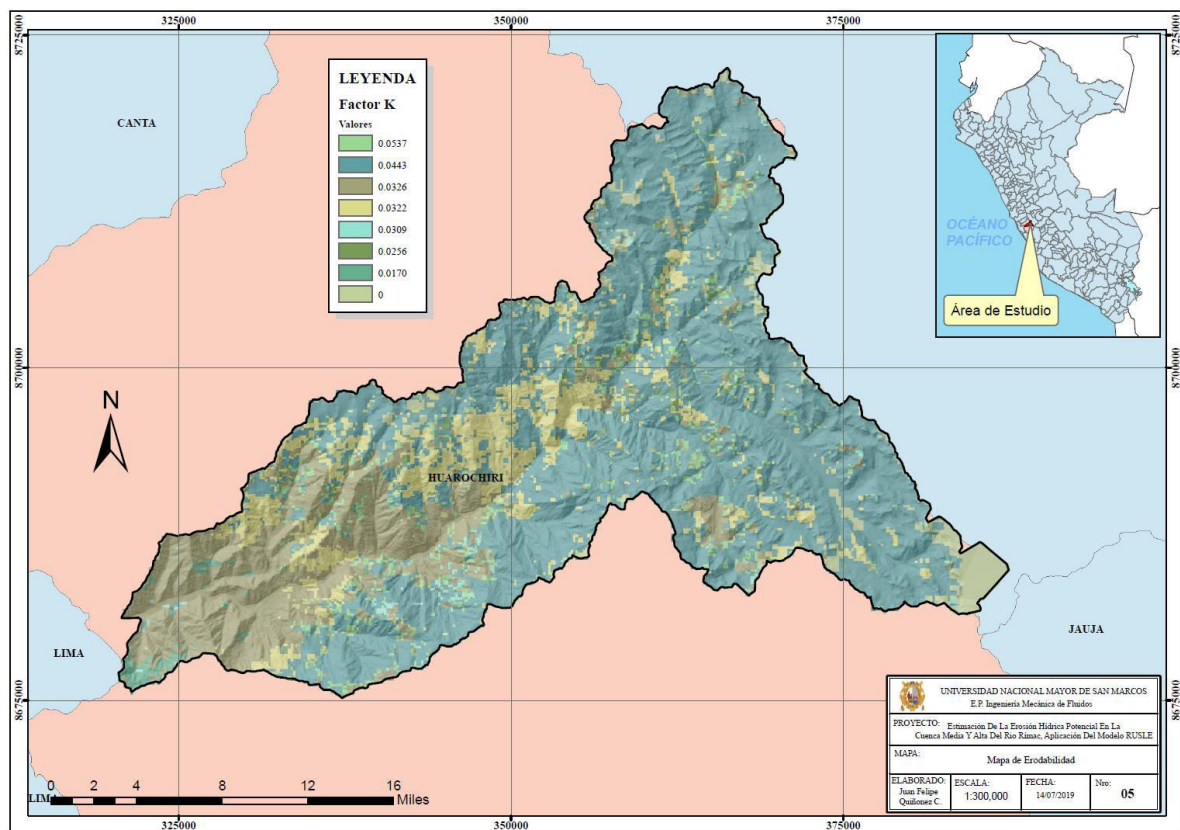


Figura 5.2 Mapa de Erodabilidad del Suelo – Factor K.

Según la clasificación textural de suelo en la **Tabla 5.2**, se evidencian valores de erodabilidad de nuestra cuenca así como la distribución geométrica en hectáreas, de esta manera se puede destacar que el 60% del área total está conformado por suelo Franco con un factor k de 0.0443, seguidamente por un 20% que lo conforman los suelos Franco Arenoso Arcillosos con valores de k iguales a 0.0327.

Nro.	Clase Textural	K	ha	%
1	Arcilloso	0.0257	1371.94	1
2	Arcilloso limoso	0.0293	0.00	0
3	Arcilloso Arenoso	0.0170	916.31	1
4	Franco Limoso Arcilloso	0.0417	0.00	0
5	Franco Arenoso Arcilloso	0.0327	23454.56	20
6	Franco Arcilloso	0.0323	14681.25	13
7	Limoso	0.0673	0.00	0
8	Franco Limoso	0.0537	4794.19	4
9	Franco	0.0443	69584.06	60
10	Arenoso	0.0047	0.00	0
11	Franco Arenoso	0.0310	764.44	1
12	Arenoso Franco	0.0133	0.00	0

Tabla 5.2 Distribución geométrica del factor k en nuestra área de estudio. (Fuente: Elaboración propia a partir de clasificación de Kirkby y Morgan)

Si bien las texturas medias del suelo son moderadamente susceptibles a la erosión (Franco – 60% del área total), las texturas medias finas también tienen esta característica (Franco Arenoso Arcilloso 20% del área total), es por eso que tienen similares valores del factor k de entre 0.0443 y 0.0327.

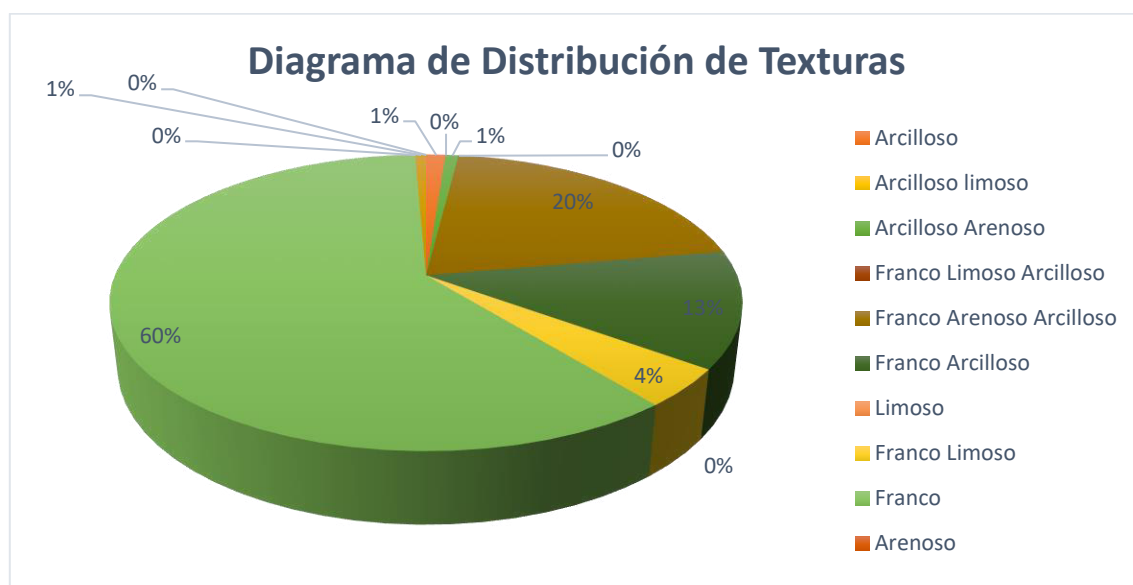


Gráfico 5.1 Diagrama de distribución de texturas en la Cuenca Media Alta del Río Rímac (Fuente: Elaboración propia)

5.1.3 Relieve y Pendiente - Factor LS

Luego de la obtención de los Modelos Digitales de Elevación se pasó a clasificar las áreas con pendientes características (%) en rangos diferenciados tal como lo establece la FAO en la **Tabla 5.3**. También se observa que se obtuvieron las áreas clasificadas por rango de pendiente, de esta manera podemos notar que predominan las pendientes Escarpado y Muy Escarpado con un 38% y 40% del área total respectivamente **Gráfico 5.2**.

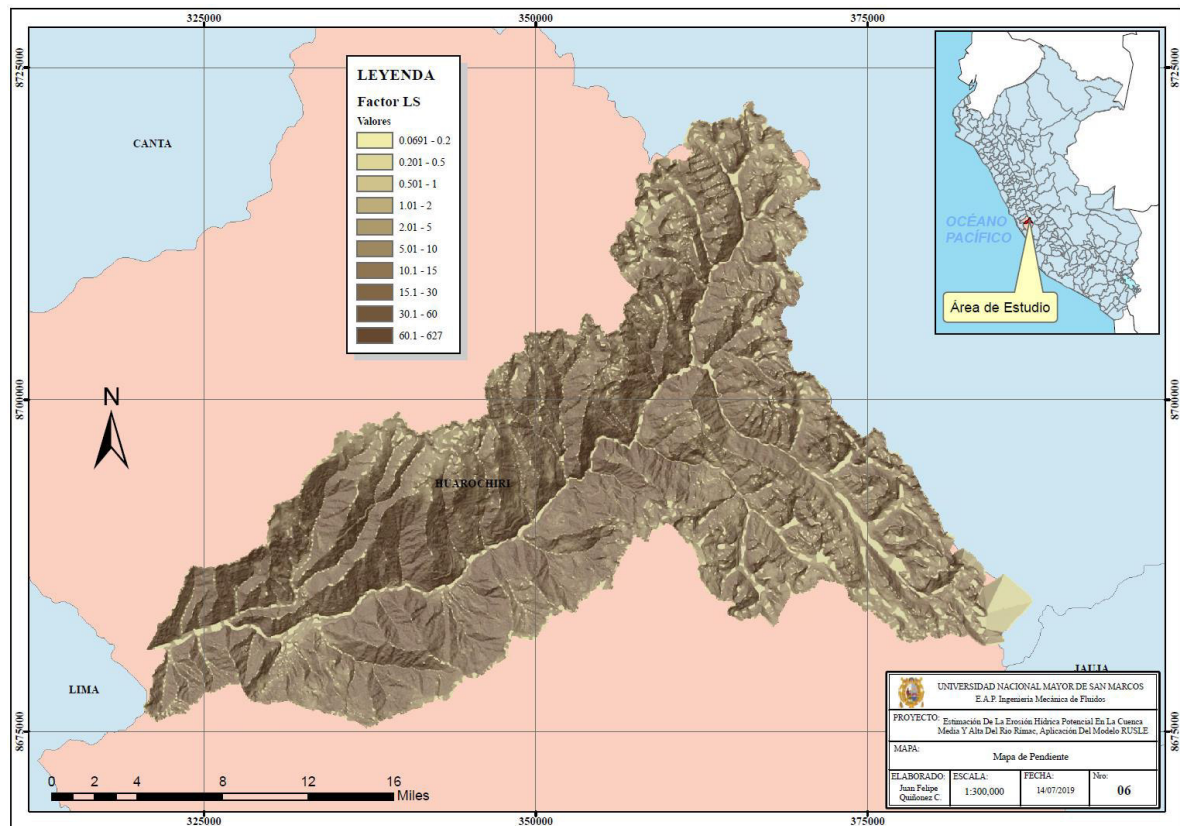


Figura 5.3 Mapa de Pendientes o topográfico – Factor LS.

La distribución del factor LS según la metodología expuesta en el subcapítulo 2.5.3 muestra valores obtenidos de entre 0.0691 hasta 627 a lo largo de toda nuestra área de estudio. Según lo observado no existen valores del factor LS que estén fuera de los parámetros adecuados.

Clase	Descripción	Pendiente %	ha
01	“Plano”	0 - 0.2	5072.9
02	“Nivel”	0.2 - 0.5	163.26
03	“Cercano al Nivel”	0.5 - 1.0	266.76
04	“Muy ligeramente inclinado”	1.0 - 2.0	961.38
05	“Ligeramente inclinado”	2 - 5	1661.9
06	“Inclinado”	5 - 10	2015.4
07	“Fuertemente inclinado”	10 - 15	2761.8
08	“Moderadamente escarpado”	15 - 30	14688
09	“Escarpado”	30 - 60	46390
10	“Muy escarpado”	> 60	49915
TOTAL			123897

Tabla 5.3 Clasificación de la pendiente (FAO, 2009)

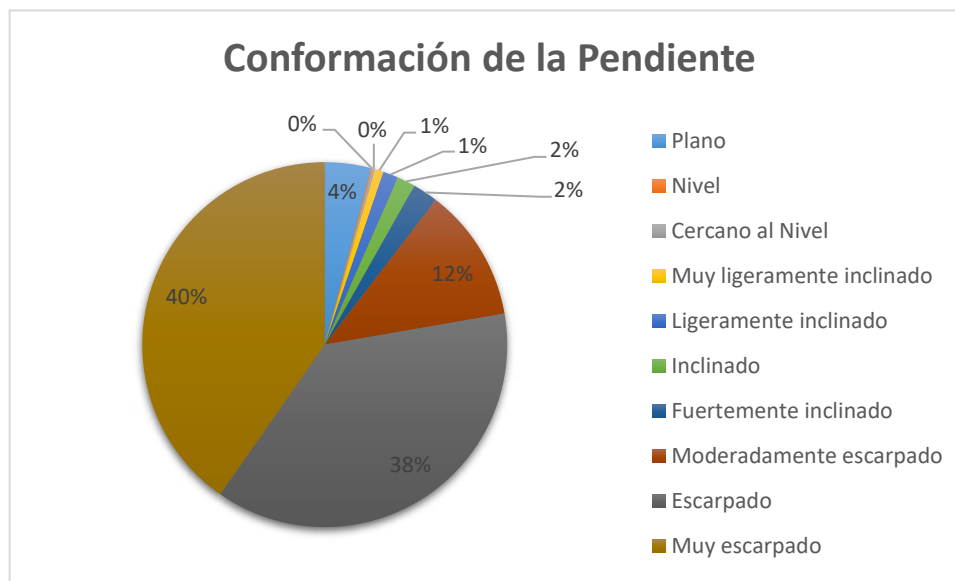


Gráfico 5.2 Distribución en porcentajes de las áreas con pendientes clasificadas (Fuente: elaboración propia).

5.1.4 Cobertura Vegetal - Factor C

Para hallar el mapa de cobertura vegetal se utilizó clasificación supervisada mediante el ArcMap tomando como base imágenes satelitales de Octubre del 2015 a una resolución de 30m obteniendo así una clasificación de nueve tipos de cobertura típica de la zona y finalmente asignándole un factor C a cada una de ellas según la **Tabla 4.4**.

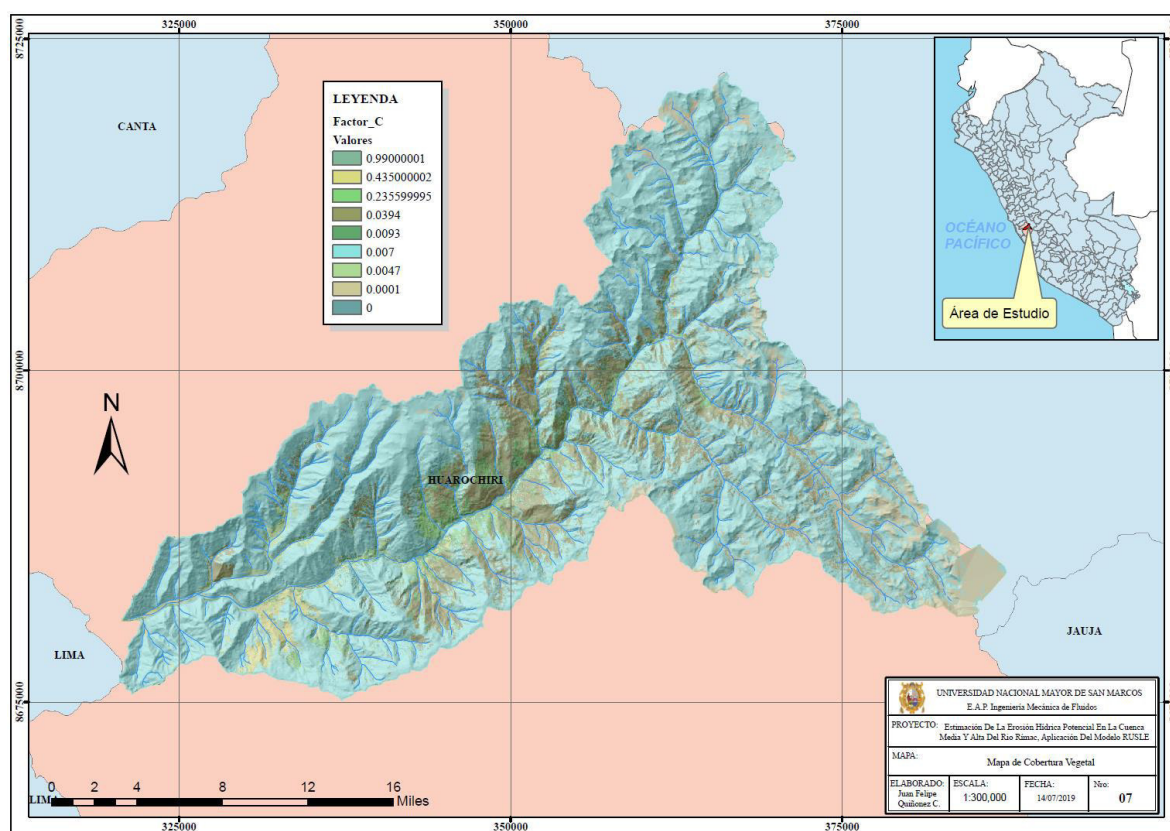


Figura 5.4 Mapa de Cobertura Vegetal – Factor C.

En la siguiente tabla se puede observar los valores que toma C a lo largo de nuestra área de estudio, así como también el área cubierta por cada clase de cobertura donde el mayor porcentaje de la cuenca es ocupada por suelos rocosos desnudos con un 71% del área total equivalente a 87859.26ha, así mismo la cobertura con menos área es la de suelo desnudo (sin cobertura vegetal) con un 0.07% y 83.43ha del área total, con un factor C de 0.99. Debemos

tener en cuenta que el valor máximo de C es de 1 que significa que no se atenuaría de ninguna forma la producción de sedimentos calculado en el RUSLE.

Código	USO Y COBERTURA	FACTOR C	ha	%
1C	Suelo rocoso desnudo	0.0070	87859.26	70.71
2C	Bofedales y cuerpos de agua	0.0001	6933.87	5.58
3C	Áreas agrícolas	0.2356	4767.48	3.84
4C	Suelo desnudo	0.9900	87.39	0.07
5C	Centro Minero	0.0000	83.43	0.07
6C	Cult. permanentes y semipermanentes	0.4350	1931.04	1.55
7C	Vegetación y pastos naturales	0.0394	19238.49	15.48
8C	Bosque denso	0.0047	1307.07	1.05
9C	Tejido urbano	0.0093	2041.56	1.64

Tabla 5.4 Clasificación de la cobertura vegetal por áreas (Fuente: Elaboración propia).

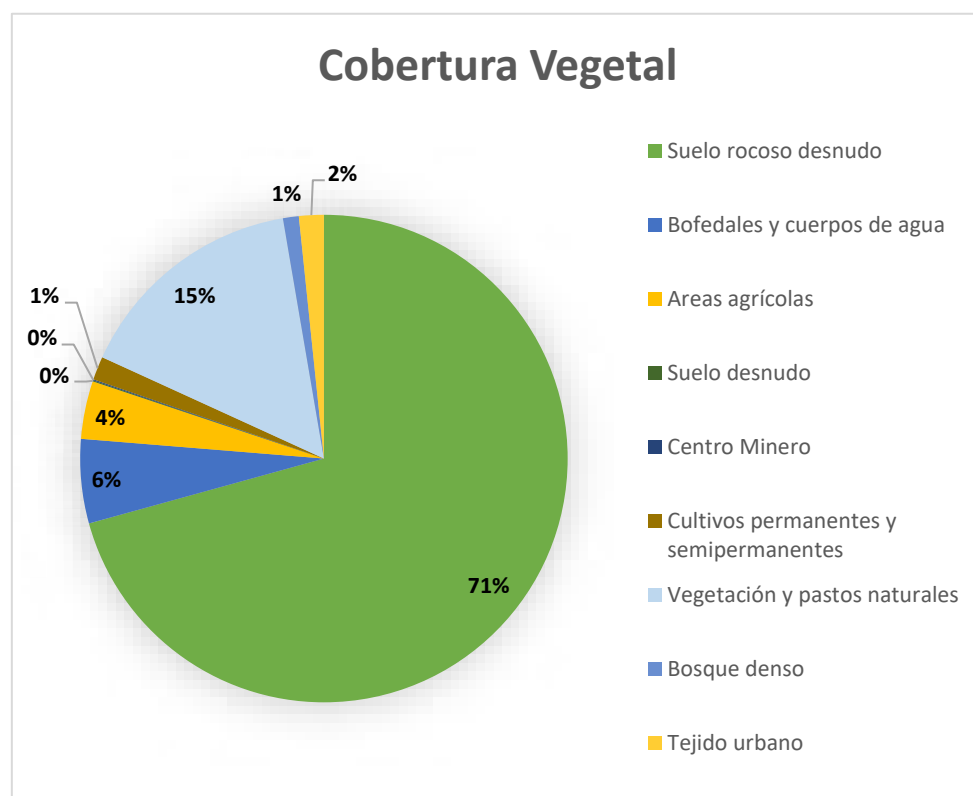


Gráfico 5.3 Distribución porcentual de la cobertura vegetal del área (Fuente: Elaboración propia).

5.1.5 Prácticas de Conservación - Factor P

En el presente trabajo no se encontró información con respecto al factor P en el área de estudio, es por ello que se le asignó un valor constante a toda la cuenca de 1, ya que al no contar con información al respecto buscamos que el mapa de conservación de suelos no influya en la estimación de la erosión.

5.2 Pérdida de Suelo Estimada en la Cuenca Media Alta del Río Rímac

Para calcular la erosión hídrica potencial se utilizó el álgebra de mapas con el módulo “RasterCalculator” de la plataforma ArcMap y como valores de entrada todos los factores que conforman la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS) o también llamada RUSLE.

Con base en los parámetros ya mencionados (R, K, LS, C y P) se procedió a calcular la erosión hídrica potencial en la cuenca media-alta del río Rímac en el año 2015, **Figura 5.5**.

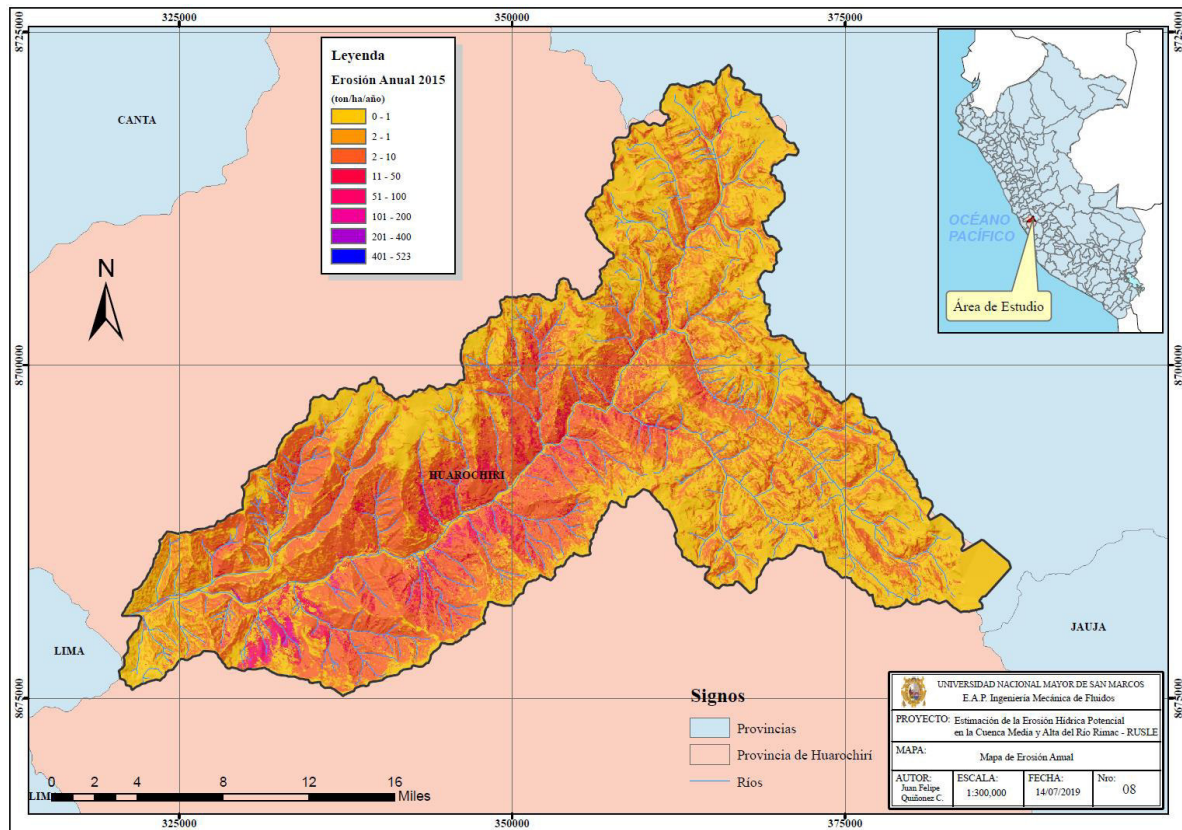


Figura 5.5 Mapa de Erosión Anual (ton/ha/año).

El mapa de erosión hídrica potencial obtenido nos muestra la distribución de la producción de sedimentos a lo largo de la cuenca en el año 2015, que toma valores mínimos como 0 ton/ha/año, pertenecientes a superficies de suelo rocoso, cuerpos de agua, bofedales, glaciares permanentes y demás superficies difícilmente erosionables típicas en nuestra zona de estudio, así como también una tasa de erosión máxima de 523 ton/ha/año, típicos de suelos altamente susceptibles a este fenómeno.

Con los valores obtenidos a lo largo de toda la cuenca en estudio, se procedió a clasificar los niveles de erosión encontrados según lo plantea la FAO (FAO, 1979). Esta clasificación se

da en cuatro rangos principalmente (Erosión Incipiente, Ligera, Fuerte y Severa) como se puede observar en la **Tabla 5.5**.

Tipo	Rango (ton/ha/año)	Clasificación
1	0 - 10	Incipiente
2	10 - 50	Ligera
3	50 - 200	Fuerte
4	> 200	Severa

Tabla 5.5 Rangos de clasificación de la erosión hídrica (Fuente: FAO 1979).

Como resultado de la erosión laminar modelada en la cuenca media y alta del río Rímac podemos observar que: 115299.72ha presentan erosión laminar por debajo de las 10 ton/ha/año, clasificada como erosión incipiente las cuales representa el 94.4% del área total de la cuenca en estudio; 5254.83ha presentan erosión en un rango de 10 a 50ton/ha/año clasificada como erosión ligera y que representan el 4.3% del área total de la cuenca en cuestión; así mismo 1535.13ha presentan erosión intensa o fuerte en un rango de 50 a 200ton/ha/año que es el 1.26% del área de estudio; finalmente 44ha presentan erosión muy intensa o severa siendo esta área el 0.04% del área total de la cuenca media y alta del río Rímac **Tabla 5.6**.

En 1977 el USDA de los EE. UU. propuso algunos Límites Permisibles de Erosión (LPE), así mismo se debe mencionar que estos límites aún no han sido validados para situación de suelo en Latinoamérica, sin embargo, algunos informes (PRODESNOS, 2011 y Morga R., 2006) mencionan que la tasa máxima permisible cuando se habla de erosión hídrica del suelo sería de 10 ton/ha/año, ya que se calcula que esta es la velocidad a la cual el suelo se regenera, entonces podemos afirmar que por encima de esta tasa no se garantiza la conservación del suelo ya que la erosión del suelo es mayor que la generación natural del mismo.

Tipo	Rango (ton/ha/año)	Clasificación	Área (ha)	Superficie afectada (%)
1	0 - 10	Incipiente	115299.72	94.40
2	10 - 50	Ligera	5254.83	4.30
3	50 - 200	Fuerte	1535.13	1.26
4	> 200	Severa	44.28	0.04

Tabla 5.6 Área de afectación según la clasificación de intensidades de erosión en cuenca. (Fuente: Elaboración propia)

En base a los aspectos específicos que conforman el fenómeno de la erosión como la pendiente, la precipitación, la cobertura y la textura de los suelos encontramos erosión máxima en la zona baja de la cuenca con más de 50 ton/ha/año entre el distrito de Santa Cruz de Cocachacra y el distrito de Santiago de Tuna. En una visita de campo se identificaron estas zonas como áreas cultivables de Tuna, dichas áreas se extienden por más de 500 ha, siendo esto un factor determinante para el grado de erosión que aquí se presenta. Cabe señalar que el factor erosividad (factor R), cumplió gran protagonismo en la tasa de erosión producida en el año 2015 en la zona en cuestión.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6 Zonas de gran producción de sedimentos por erosión laminar; (a) Laderas de cultivo de tuna, (b) Acceso a los cultivos de Tuna, (c) Cultivos jóvenes en el distrito de Cocachacra. (Fuente: Elaboración propia).

Así mismo en la visita de campo al distrito de San Mateo de Otao y Canchacaya se pudo encontrar los denominados “Bosques Densos”, esta cobertura vegetal conformada por plantas frutales de Palta fuerte, Chirimoya (típico de estas zonas), Maracuyá, guanábana, lúcuma y demás especies arbóreas caracterizan una cobertura fuerte antes efectos erosivos de las lluvias. El efecto erosivo en estas zonas fluctúa entre 0 y 1 ton/ha/año clasificándose como una zona de erosión incipiente. Cabe destacar que el abastecimiento de recurso hídricos en estas zonas es constante durante casi todo el año.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.7 Zonas de cobertura vegetal denominada Bosque Denso; (a) Quebrada donde se cultiva plantas típicas, (b) Acceso vial al poblado de Cumbe, San Mateo de Otao y Canchacaya, (c) Vista panorámica de los cultivos en el poblado de Cumbe. (Fuente: Elaboración propia).

5.3 Erosión Hídrica Simulada (Simulador de Lluvia)

Las zonas de cobertura vegetal adecuadas para lograr la simulación fueron las que nos permitieron implementar fácilmente el simulador de lluvias, así que optamos por elegir

vegetación natural escasa y de raíces poco profundas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Para reconocer el componente topográfico adecuado se realizó una clasificación de la pendiente del terreno, así como la propuesta por la FAO (**Tabla 5.8**), la cual nos sirvió para obtener un rango de pendientes ideales para efectuar las simulaciones en campo.

Para la obtención de estos valores de precipitación anual, se extrapoló la información obtenida por el simulador a la unidad de área con la cual trabaja el modelo RUSLE (ha) y la precipitación acumulada en el año 2015.

El sedimento obtenido¹⁸ mediante el simulador de lluvias se presenta a continuación clasificado según código, pendiente y cobertura estimada en campo (**Tabla 5.7**).

Nro.	Código	Clasificación de Pendiente	Cobertura - Superficie (Campo)	Erosión Hídrica Simulada ton/ha/año
1	PC010604	15% - 30%	Vegetación natural	0.1313
2	PC022104	30% - 60%	V. natural - húmeda	0.3878
3	PC032104	30% - 60%	Suelo descubierto	14.3577
4	PC042104	15% - 30%	Seco - pedregoso	0.4839
5	PC052204	15% - 30%	Vegetación densa	0.2009
6	PC062204	15% - 30%	Cultivo estacional	1.9590

Tabla 5.7 Erosión hídrica utilizando el Simulador de lluvia en campo, para una precipitación total similar a la del año 2015.

Clase	Descripción	%
01	Plano	0 - 0.2
02	Nivel	0.2 - 0.5
03	Cercano al Nivel	0.5 - 1.0
04	Muy ligeramente inclinado	1.0 - 2.0
05	Ligeramente inclinado	2 - 5
06	Inclinado	5 - 10

¹⁸ El sedimento obtenido es el resultado de la media de dos ensayos realizados en los puntos descritos anteriormente y que guardan las mismas características y condiciones de prueba. Esto se realizó con el fin de obtener una mejor precisión de la muestra representativa.

07	Fuertemente inclinado	10 - 15
08	Moderadamente escarpado	15 - 30
09	Escarpado	30 - 60
10	Muy escarpado	> 60

Tabla 5.8 Clasificación de la pendiente (FAO, 2009)

5.4 Análisis Comparativo: Resultados Modelados y Simulados

Una vez obtenidos los resultados del modelamiento (RUSLE) y la simulación (Simulador de lluvias en campo), se plasmaron los resultados en un cuadro a fin de realizar un contraste y establecer una relación entre los datos, de esta manera analizamos y estimamos en cierto grado la fiabilidad y el buen uso de este método en esta investigación.

Nro.	Código	Clasificación de Pendiente	Cobertura - Superficie (Campo)	“Erosión Hídrica Simulada” (ton/ha/año)	“Erosión Hídrica Modelada” (ton/ha/año)
1	PC010604	15% - 30%	Vegetación natural	0.1313	0.4474
2	PC022104	30% - 60%	V. natural - húmeda	0.3878	1.9370
3	PC032104	30% - 60%	Suelo descubierto	14.3577	14.5352
4	PC042104	15% - 30%	Seco - pedregoso	0.4839	0.9357
5	PC052204	15% - 30%	Vegetación densa	0.2009	0.4929
6	PC062204	15% - 30%	Cultivo estacional	1.9590	9.0291

Tabla 5.9 Cuadro comparativo de los valores de erosión obtenidos en la Simulación en campo y la Erosión modelada con la EUPS (RUSLE).

En la **Tabla 5.9** se muestran los valores obtenidos por código, rango de pendiente y cobertura aproximada en campo, de la erosión simulada en los 6 puntos de prueba anteriormente indicados, así como también los valores de erosión obtenidos mediante la RUSLE. De acuerdo con estos valores se obtuvo una relación con la cual se podría ejecutar una

calibración para estimar el valor de la tasa de erosión anual en la cuenca en cuestión en el año 2015.

Podemos observar además que los valores modelados superan a los simulados generalmente en gran porcentaje, dando a entender que el valor modelado podría estar sobre estimado.

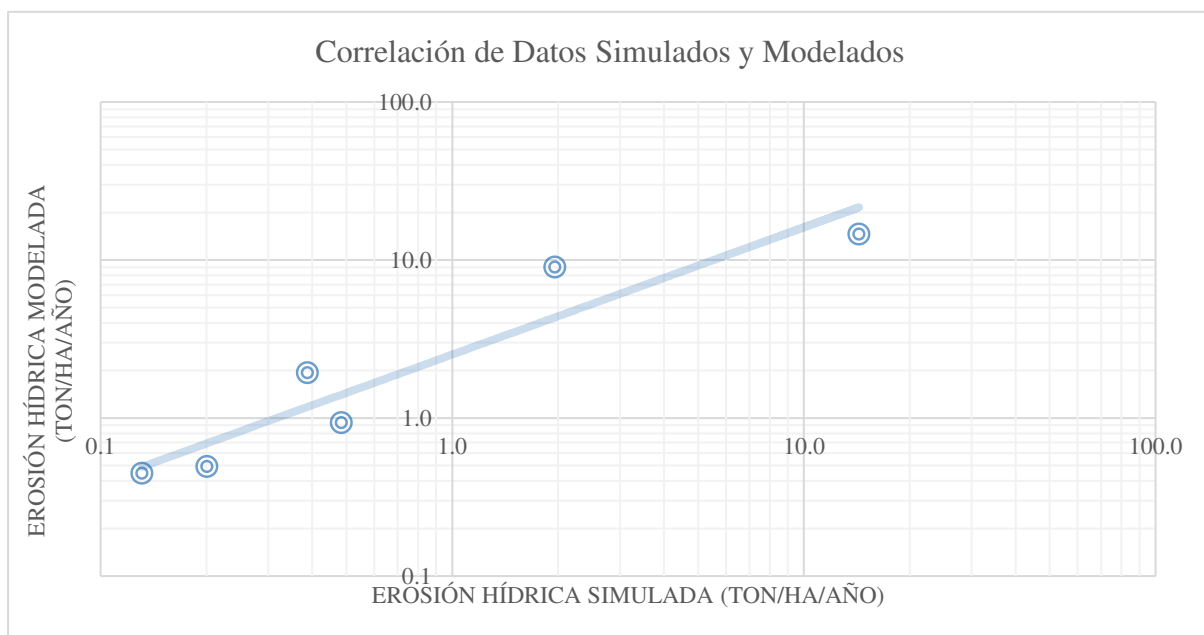


Gráfico 5.4 Erosión Hídrica Simulada versus la Erosión Hídrica Modelada para la cuenca media y alta del río Rímac.

En el **Gráfico 5.4** podemos observar una relación positiva entre los datos obtenidos, el $R^2 = 0.7931$ denominado coeficiente de determinación nos indica que la recta de regresión es óptima en un 79% entre los datos de erosión modelada con el RUSLE y los datos de erosión simulada en campo.

En otras investigaciones se evidencian valores de $R^2 = 0.70$ constituyen un valor muy bueno en modelos de erosión, ya que valores mayores o iguales a $R^2 = 0.5$ son tomados como aceptables dada la variabilidad de los datos tomados en campo.

6. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Es posible estimar la tasa de producción de sedimentos de la cuenca media alta del río Rímac con el modelo RUSLE mediante métodos más prácticos e información disponible, así mismo se logró identificar zonas de alta exposición a la erosión hídrica potencial. Dichas tasas se pudieron calcular para los años 2014, 2015, 2016 y 2017.

- Se logró determinar los parámetros que componen el RUSLE o EUPS, utilizando metodologías más prácticas e información disponible, sin embargo, se necesita información con mucho más detalle, debido a ello se tubo dificultad al calcular y distribuir factores como la cobertura vegetal (Factor C) para edades y tamaños de cobertura en ciertas estaciones del año, así mismo la distribución geoespacial de texturas del suelo (Factor K a 250m/pix) fueron encontradas a resolución muy baja.
- La simulación en campo permitió obtener la erosión laminar causada por una lluvia con parámetros controlados con valores de erosión de 0.1313 ton/ha/año (vegetación natural), 14.3577 ton/ha/año (suelo descubierto) o 1.9590 ton/ha/año (cultivos estacionales). Dada la experiencia en campo este proceso podría arrojar valores muy variables si no se tienen en consideración parámetros como, el viento incidente, calibración de la lluvia simulada, volumen de lluvia caída, además del número de ensayos realizados en un solo punto.
- Luego de realizar el análisis de correlación entre las tasas de erosión hídrica modelada y las tasas de erosión hídrica simulada en campo se puede afirmar que ambas mantienen una relación positiva con un coeficiente de determinación de 0.79, sin

embargo, también se aprecia que la erosión modelada (RUSLE) en algunos puntos, se encuentra sobreestimada en casi un 100% o más en comparación con la erosión hídrica simulada (Simulador de Lluvias). Estas afirmaciones no son determinantes ya que considerando una muestra poblacional de seis ensayos (simulaciones) no se podría aseverar una regla de calibración definitiva en este caso.

- La tasa de erosión potencial predominante en la cuenca media-alta del río Rímac en el año 2015 es inferior a 10 ton/ha/año clasificada como incipiente en un área de 115 299.72 ha, que equivale al 94.4% del área total de estudio, así también existen sectores de erosión elevados de hasta 522 ton/ha/año ubicados generalmente en la cuenca media. En la presente tesis solo se presentaron las tasas de erosión potencial de los años 2014, 2015, 2016 y 2017 (**ANEXO A**). La tasa de la erosión para años anteriores al 2014 no se presentó pues la información disponible de los factores (cobertura vegetal y uso de suelos) es escasa o no se encuentra disponible gratuitamente para dichos años. Cabe señalar que la erosión es un fenómeno espacio temporal que se intensifica con el factor erosividad dado por ejemplo en el “Fenómeno del Niño”, año 2017 en donde la tasa de erosión en algunos sectores (cuenca media) alcanzaron las 1550 ton/ha/año clasificándose como erosión severa.

Recomendaciones

En cuanto a la climatología, se recomienda distribuir más puntos de monitoreo de precipitación, es decir estaciones automáticas de registro en el área de estudio, ya que los microclimas generados ocasionan sectorización de lluvias y por ende diferentes niveles de erosión ya que el “factor r” es fundamental para la determinación de este fenómeno.

Si bien es cierto el factor C se clasificó en nueve tipos según bibliografía y se añadieron otras según inspección en campo, se recomienda implementar más clases de cobertura que cubran los rangos del $k = 0.43$ a $k = 0.9$, según fase fenológica de la vegetación de la zona. Una muestra de la variabilidad de este factor se dio en campo al realizar el ensayo N°3 en el distrito de Matucana, en donde se encontró suelo disturbado dos semanas atrás, pero con rala vegetación de tallo delgado y raíces pequeñas. Claramente no se podría clasificar como cobertura de suelo desnudo con valores de $K=0.99$ y tampoco como cultivo permanente o semi permanente ($K = 0.435$).

La resolución más fina de datos satelitales, brinda un mayor detalle en la estimación de la erosión hídrica, pero mucha de esa data no es gratuita, pero se recomienda utilizar si la economía del proyecto lo permite.

La cartografía por fotogrametría es una tecnología cada vez más utilizada y es realizada mediante el uso aeronaves pilotadas a distancia (RPAs o Drones). En tal sentido se recomienda utilizarla para sectorizar con mucho más detalle cobertura vegetal, uso de suelo o prácticas de manejo con rangos de resolución aceptables (20cm/pix – 30m/pix).

Se debe tener en cuenta que, a mayor número de simulaciones en campo, el análisis de ajuste con el RUSLE y futura calibración del modelo será mucho mejor y los resultados mucho

más consistentes. Estos valores se podrían obtener de estaciones definidas para una evaluación constante con lluvia real.

Productos como el PISCO (SENAMHI) nos ofrecen datos históricos de precipitación acumulada muy útil para estimaciones de la erosión hídrica, así mismo la retroalimentación constante y la consistencia de sus datos nos ofrecen gran confiabilidad para su uso en este tipo de metodologías.

7. Referencias

- Aliaga Araujo, S., & De Piérola Canales, J. (1978). *Análisis de Consistencia de Series Hidrometeorológicas*. Lima: Departamento de Recursos de Agua y Tierra "La Molina".
- Bolivar, K., Rivero, C., Urbina, J., & Yepez, O. (30 de Marzo de 2016). *Grupo 02 Sedimentología Sección: 01*. Obtenido de <http://sedimentologiagrup02.blogspot.com/2016/03/transporte-de-sedimentos.html>
- Brea, J. D., & Balocchi, F. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. Vol I). Montevideo: Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Campaña Zapata, F. D. (2015). *Aplicación del modelo RUSLE para el cálculo de erosión hídrica en la microcuenca del río Perlaví*. Quito, Ecuador: Tesis de grado - Universidad Central de Ecuador Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera de Ingeniería Agronómica.
- Carvajal, R., & Giráldez, J. (2000). *Análisis de la producción de sedimentos en una cuenca con un sistema de información geográfica*. Colomera: Ingeniería del Agua.
- Catalanes, I. d. (2010). *Instituto de Estudios Catalanes*. Obtenido de <https://www.iec.cat/mapasols/Cas/erosio1.asp?Grup=A&Opcio=3>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. (M. E. R., Ed.) Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.
- Cisneros, J. M., Cholaky, C. G., Cantero Gutierrez, A., Gonzalez, J. G., Reynero, M. A., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión Hídrica - Principios y técnicas de manejo*. Río Cuarto, Córdoba, Argentina: UniRío editora.
- Cubero Fernández, D. (1994). *Manual de manejo y conservación de suelos y aguas*. Costa Rica: s.n.
- F.R., T., Hobb, & Donahue, J. y. (1991). *Soil and Water Conservation*. Prentice Hall.
- FAO. (1967). *La erosión del suelo por el agua*. Roma: Colección FAO: Fomento de tierras y aguas Nro 7.

- FAO. (1979). *A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2000). *Manual de practicas integradas de manejo y conservación de suelos*. Roma: ONU.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de los suelos*. Roma: División de Información FAO Roma, Italia.
- Flores Villanueva, A. L., & De Lara Suárez, L. M. (2015). *Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca shambillo, distrito de padre abad*. Ucayali.
- Fournier, F. (1972). *Soil conservation. Nature and environment series*. Council of Europe.
- García, W. (27 de marzo de 2015). *Memorias de un peruano en Asturias*. Obtenido de <https://peruanoenasturias.blogspot.com/search?q=Huarochir%C3%AD+comprende+las+regiones+naturales+>
- García-Chevesich, P. (2008). *Procesos y control de la erosión*. Denver: Outskirts Press CO. 276p.
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibañez Asensio, S., & Moreno, R. H. (2012). *El Factor K de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE)*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Hairston, J. E. (2001). *Estimating Soil Erosion Losses and Sediment Delivery Ratios*. Alabama: A&M and Auburn Universities,.
- Ibañez Asencio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2012). *El uso de un simulador de lluvia*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural - Producción Vegetal.
- INETER, & COSUDE. (2005). *Erosión Hídrica - Mapas de Amenaza*. Managua, Nicaragua: Abdel García G.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2007). *Riesgo de la Erosión Hídrica y Proyección de Acciones de Manejo y Conservación de Suelo en 32 Cuencas de San Luis de Potosí*. Potosí. Obtenido de www.iec.cat

- Kanchariq, L. (8 de mayo de 2017). *Territorio Sociedad y Cultura*. Obtenido de <http://territoriosociedadycultura.blogspot.com/>
- Kirby, & Bracken, M. y. (2005). *Modeling hillslope connectivity and channel interections in semiarid areas*. IAHS Publication.
- Lal, R. (1996). *Soil erosion, conservation and rehabilitation*.
- Martínez Valdés, H. (2010). *Desarrollo de una metodología hidrogeomática para estimar la contaminación difusa en aguas superficiales de una cuenca*. México: Tesis Doctoral - Universidad Autónoma del Estado de México,.
- Martinez, M. (1983). *Prespectivas técnicas sobre la conservación de productividad de los suelos en México*. México: s.n.
- Monge Jeremías, R., & Aguilar Pereira, J. F. (2008). *Manual De Operación Del Simulador De Lluvia Para La Cuantificación De La Infiltración, Escorrentía Y Erosión De Suelos*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Montoya, R. D., Montoya, L. J., & Anaya, J. A. (2005). *Evaluación de la producción de sedimentos en la cuenca del río la miel*. Medellín: Universidad de Medellín.
- Morales, A. M. (2014). *Estimación de la Erosión Laminar y Sedimentación con Modelos Hidrológicos para la Selección de Prácticas de Conservación de Suelos y Cambios de Cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud - Haití*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Morgan, R. (1995). *Soil Erosion and Conservation*. Longman Group Limited.
- Morgan, R. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. España: Mundi-Prensa.
- Morgan, R. (2005). *Soil erosion and conservation*. Reino Unido: National Soil Resources Institute.
- Morris, G., & Fan, J. (1997). *Reservoir sedimentation handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Osterkamp, W. (2008). *Annotated Difinitions of Selected Geomorphic Terms and Related Terms of Hydrology, Sedimentology, Soil Science and Ecology*. Virginia: Reston.
- Pan, J., & Wen, Y. (2014). *Estimation of soil erosion using rusle in caijiamiao*. China: Natural hazards.

- Pla, I. (2006). *Future of Soil Science IUSS*. Wageningen, Holanda: s.n.
- Porta, J., & López - Acevedo, M. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Bilbao: Grafos.
- Proyectos Wikimedia. (20 de Junio de 2019). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Huarochoir%C3%AD
- Ramos Taipe, C. L. (2001). *Modelamiento ambiental para análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del rio cañete y determinación del mapa de erosión*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Renard, K. G., & Foster, G. R. (1997). *Predicting rainfall-erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington DC, USA: Agriculture Handbook: 703 United States Department of Agriculture.
- Rodriguez, M. (2008). *Potencialidad de las técnicas SIG para la gestión medioambiental. Aplicación ala erosión*. España.
- Sabino Rojas, E. D. (2016). *Análisis espacio - temporal de erosión de suelos por regiones hidrológicas en el Perú (1981-2014)*. Lima: E.A.P. de Ingeniería Geográfica.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (22 de septiembre de 2016). *Senamhi Portal de Transparencia*. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/>
- Slack, D., Martin, E., Sheta, A., Fox, J., Clark, L., & Ashley, R. (1996). *Crop coefficients normalized for climatic variability with growing-degree-days*. In: *Proceeding of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Sheduling*. San Antonio: TX. Pp892-898.
- Suarez de Castro, F. (1980). *Conservación de Suelos*. San José, Costa Rica: IICA.
- Terrence, J., Foster, G., & Renard, K. (2002). *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. New York: John Wiley and sons NY. 338p.
- Vahrson, W., & Cervantes, C. (1991). *Escorrentía Superficial y Erosión laminar en Puriscal Costa Rica*. Heredia: UNA.

- Valcarsel, R. (1989). *Estudio de los procesos erosivos en una microcuenca: Zona Central de España - PUEBLA DE VALLES*. Madrid, España: Tesis Doctoral - Universidad Politécnica de Madrid.
- Villón Béjar, M. (2016). *Hidrología Estadística*. Lima: Editorial Villón - Quinta Edición.
- Wikimedia, P. (11 de Julio de 2019). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_del_suelo
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting Rainfall erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains*. US: Handbook.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion lossesa*. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning.

8. ANEXOS

ANEXO A

Mapas de Erosión de Suelo

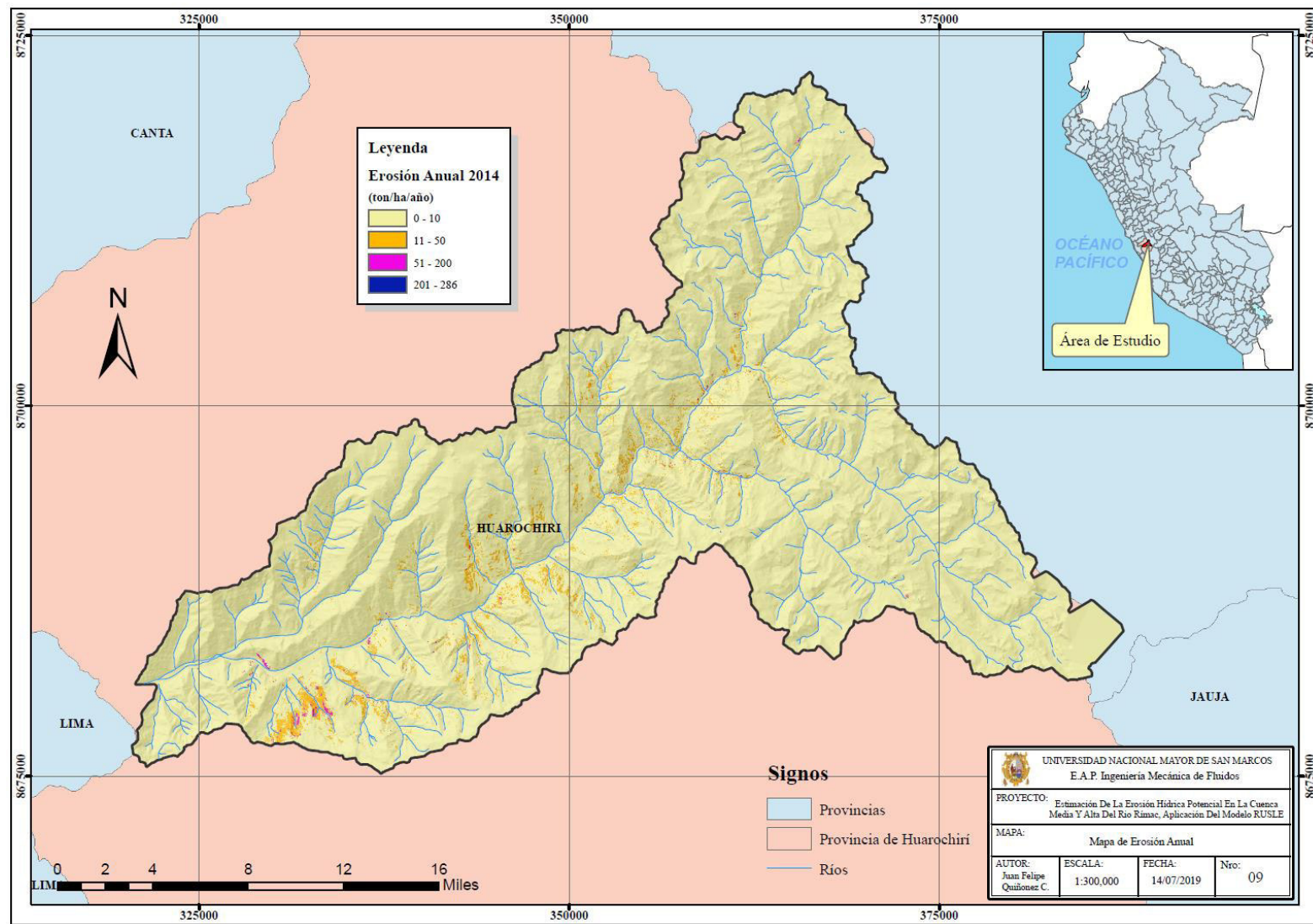


Figura 8.1 Mapa de Erosión de Suelos del 2014.

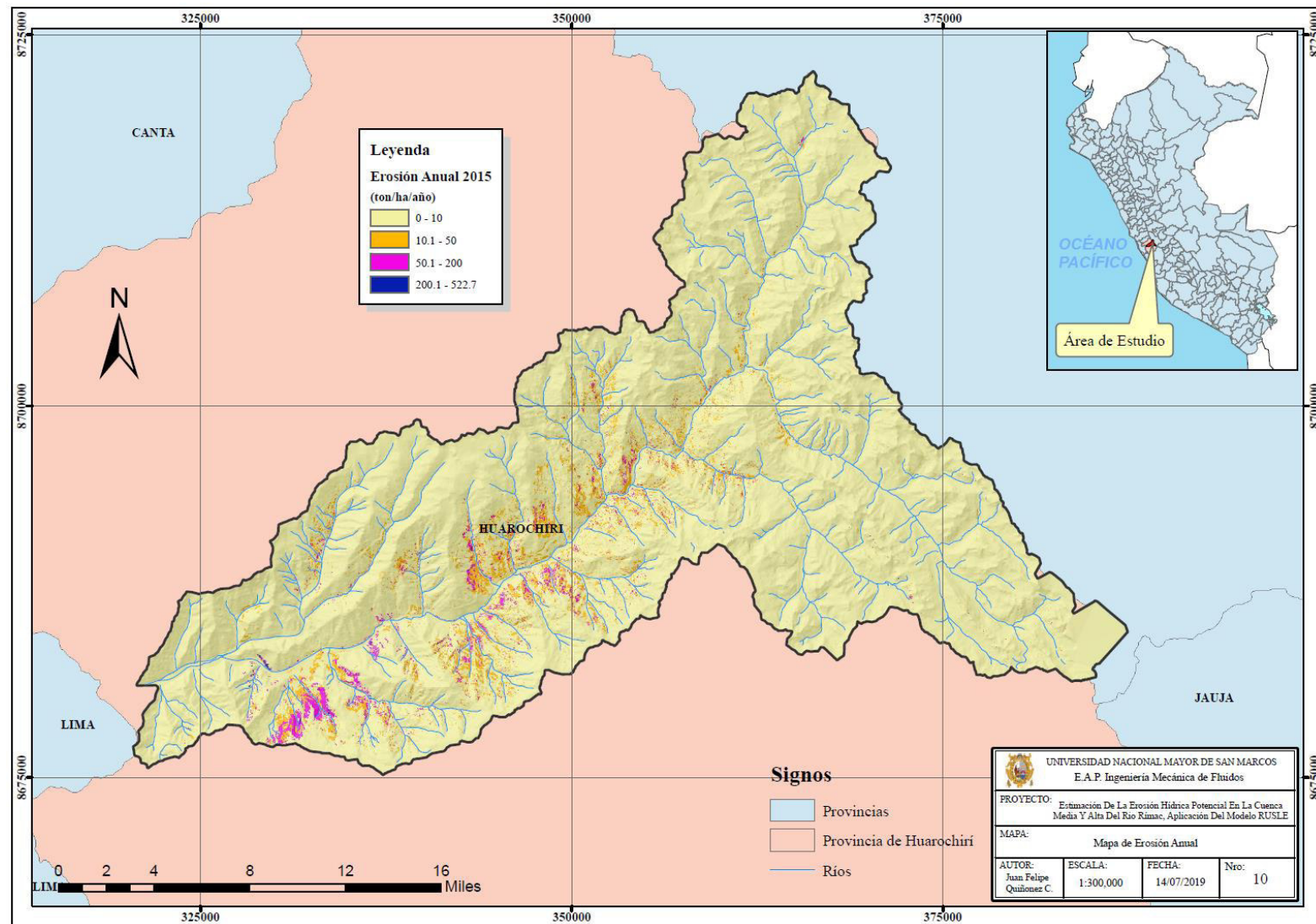


Figura 8.2 Mapa de Erosión de Suelos del 2015

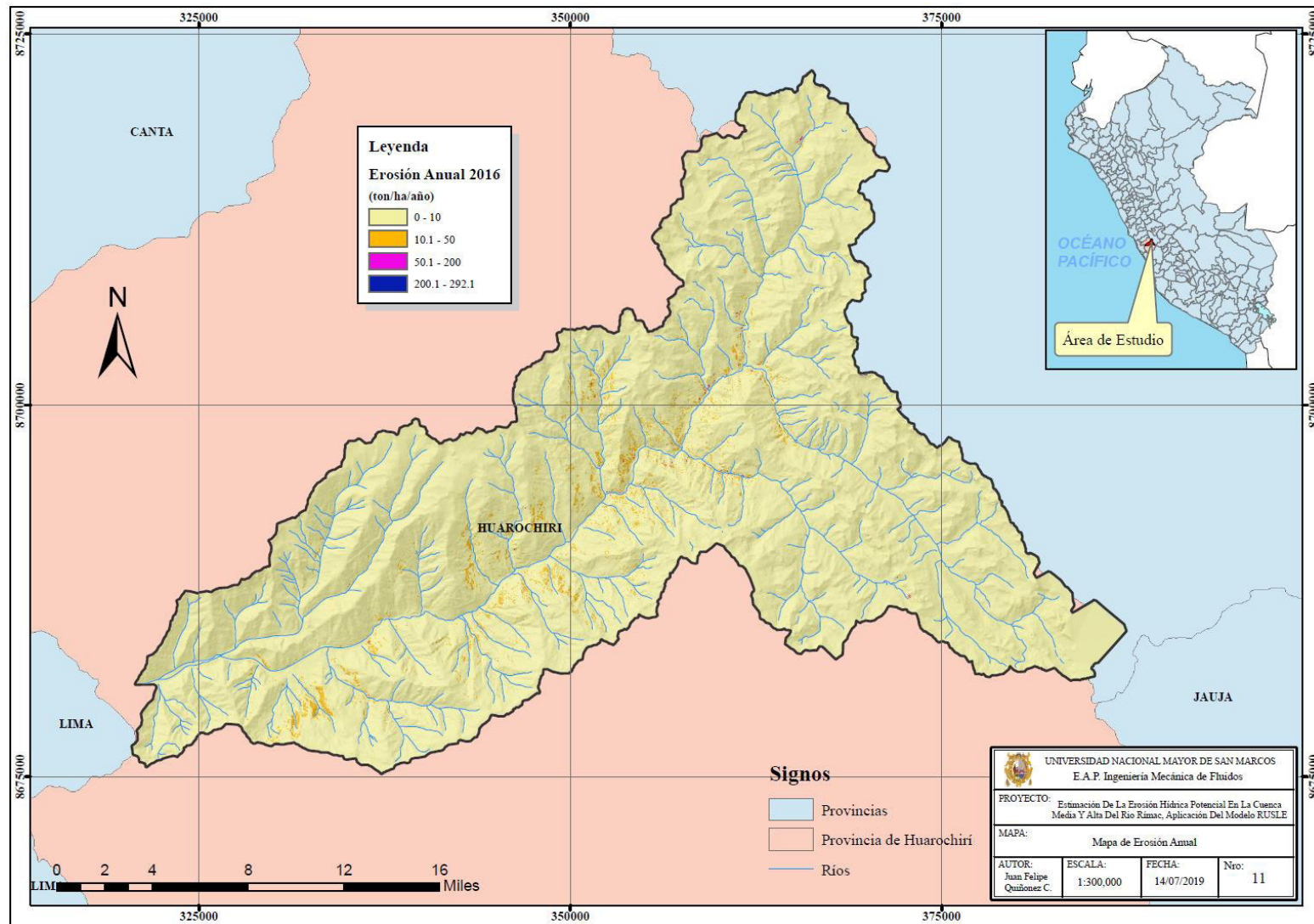


Figura 8.3 Mapa de Erosión de Suelos del 2016

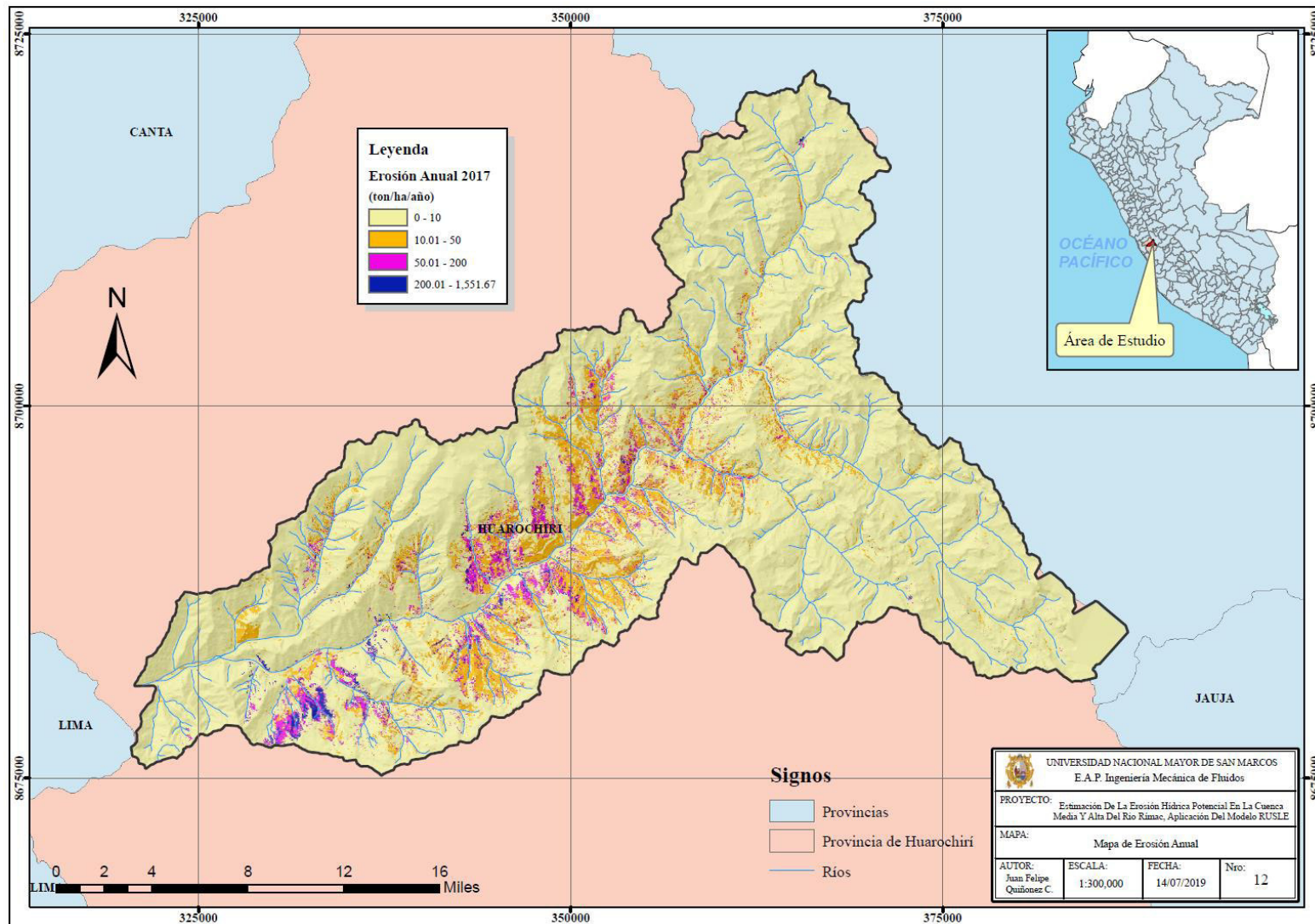


Figura 8.4 Mapa de Erosión de Suelos del 2017

ANEXO B

Precipitación Histórica de las Estaciones

ESTACIÓN RÍO BLANCO

ESTACION	RIO BLANCO/151210	LAT	11° 44' 4.3"	DPTO	LIMA
PARAMETRO	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	LOG	76° 15' 32"	PROV	HUAROCHIRI
		ALT	3350 msnm	DIST	CHICLA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	49.1	18.3	0.0	15.1	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	85.6	79.9	259.0
1991	12.3	63.4	136.5	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	19.0	5.1	27.6	273.6
1992	14.1	27.3	37.7	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.8	19.0	22.0	198.2
1993	128.8	117.0	28.2	49.9	5.5	0.0	0.7	1.5	16.1	21.4	64.0	118.4	551.5
1994	102.4	172.7	120.6	53.0	8.7	3.9	0.5	8.7	18.7	15.3	46.3	60.8	611.6
1995	33.3	78.7	84.6	65.0	0.0	2.4	0.0	0.0	5.8	21.1	43.6	59.8	394.3
1996	49.7	112.7	62.8	42.0	4.4	0.0	7.0	0.0	4.2	19.6	13.2	26.1	341.7
1997	73.2	145.3	18.5	11.5	5.3	0.0	0.0	1.8	33.1	29.5	33.5	94.3	446.0
1998	120.0	123.0	109.5	29.2	0.0	1.2	3.1	2.2	26.9	41.7	34.9	46.8	538.5
1999	100.2	194.0	97.9	54.4	33.2	2.9	0.0	3.2	20.0	34.2	73.2	125.1	738.3
2000	140.9	135.9	215.9	13.1	17.6	0.0	0.0	8.4	10.6	62.5	28.2	154.3	787.4
2001	183.1	117.6	190.2	27.8	9.5	0.0	0.9	0.0	5.6	24.3	78.8	55.9	693.7
2002	93.6	106.1	121.3	55.2	19.3	3.2	1.9	0.7	22.9	43.5	66.3	93.1	627.1
2003	138.0	124.2	223.9	44.4	2.6	0.0	0.0	1.4	0.0	43.0	7.1	114.6	699.2
2004	38.6	105.7	78.3	41.9	11.4	9.5	3.0	0.0	25.7	65.5	77.3	150.4	607.3
2005	92.9	64.4	116.3	13.9	2.4	0.0	0.0	0.0	6.9	6.9	13.9	98.3	415.9
2006	98.7	101.8	207.0	45.1	0.0	2.8	0.0	8.3	10.5	33.8	69.4	111.7	689.1
2007	135.5	167.4	160.4	40.4	4.1	0.0	0.0	0.9	15.9	15.9	25.1	82.9	648.5
2008	139.3	116.8	84.8	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	31.7	33.8	102.5	533.8
2009	116.6	165.0	110.6	49.3	16.0	0.0	0.2	7.4	6.4	51.3	110.6	70.7	704.1
2010	134.3	93.8	133.6	36.9	2.9	4.3	0.0	1.1	3.9	28.0	31.0	134.0	603.8
2011	148.4	125.5	131.0	83.9	3.4	0.0	0.5	0.0	2.1	10.2	45.5	114.7	665.2
2012	81.0	165.9	112.1	121.2	7.5	2.1	0.2	0.8	27.0	48.6	69.0	87.6	723.0
2013	90.4	126.9	145.2	37.5	28.3	1.0	3.0	9.5	6.5	30.2	37.7	95.0	611.2
2014	114.9	85.8	136.3	45.2	3.9	0.3	8.6	23.7	16.3	48.9	53.5	117.8	655.2
2015	120.6	86.1	125.4	43.7	10.5	12.6	2.0	19.5	15.2	26.9	44.4	64.7	571.6
2016	34.7	137.8	80.5	30.8	0.6	0.7	0.5	1.0	45.3	21.6	1.4	86.4	441.3
2017	178.9	230.4	162.2	63.0	30.4	0.5	0.0	2.3	12.5	50.4	30.1	58.1	818.8
PROM	98.7	118.2	115.4	41.9	8.3	1.7	1.1	3.7	13.1	32.0	44.3	87.6	

Tabla 8.1 Precipitación acumulada de la Estación Río Blanco (Fuente: SENAMHI)

ESTACIÓN MATUCANA

ESTACION	MATUCANA/472CE45A	LAT	11° 50' 20.8"	DPTO	LIMA
PARAMETRO	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	LOG	76° 22' 40.8"	PROV	HUAROCHIRI
		ALT	2479 msnm	DIST	MATUCANA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	52.2	4.9	19.7	1.9	6.1	0.3	0.0	0.6	0.0	13.4	36.4	43.0	178.5
1991	12.7	60.6	116.4	11.7	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	17.9	4.4	4.4	230.2
1992	29.2	25.0	101.8	26.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	4.4	21.9	240.9
1993	98.8	158.9	147.4	50.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0	40.0	98.9	618.4
1994	64.9	95.3	45.6	33.2	2.6	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	12.4	51.6	306.4
1995	62.6	31.5	61.5	35.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	8.9	34.0	39.8	278.7
1996	72.5	80.6	87.9	27.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	7.2	280.1
1997	45.9	50.7	9.4	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	14.3	49.4	180.9
1998	91.6	111.4	122.9	17.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.2	0.0	0.0	19.9	367.5
1999	57.2	163.3	54.3	24.4	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	19.1	19.3	30.1	371.7
2000	82.5	105.3	67.8	21.9	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	17.1	0.0	50.0	350.2
2001	116.8	65.1	110.2	14.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	41.4	2.2	352.5
2002	17.8	74.3	61.9	32.4	6.2	0.0	0.0	0.0	3.7	9.0	22.2	42.9	270.4
2003	32.3	46.0	64.1	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	86.1	244.9
2004	10.1	74.4	57.8	31.1	0.0	3.6	0.0	0.3	0.0	6.3	22.5	92.7	298.8
2005	69.7	28.9	63.1	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.7	223.3
2006	83.1	67.2	129.7	52.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	16.3	74.8	425.6
2007	73.6	60.4	143.4	30.0	0.0	0.2	0.0	0.0	1.3	4.0	0.0	26.9	339.7
2008	75.5	112.2	72.2	14.2	1.2	0.2	0.0	0.0	1.3	3.2	13.3	36.5	329.7
2009	105.5	98.9	130.6	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	37.2	51.4	473.6
2010	32.8	67.7	60.5	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	11.6	51.0	249.3
2011	35.8	37.9	33.6	33.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	14.7	29.9	186.3
2012	23.7	91.7	93.5	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	29.4	19.0	35.3	355.0
2013	27.7	83.7	80.9	26.3	5.2	0.0	0.0	0.7	1.3	9.2	12.6	35.7	283.4
2014	46.1	35.8	68.3	20.2	2.7	0.0	0.0	1.6	2.8	10.6	13.9	73.1	275.0
2015	78.9	45.6	171.9	34.2	0.0	0.0	0.0	5.1	2.4	3.6	17.2	36.2	395.1
2016	9.9	59.6	48.4	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.2	0.0	25.4	162.4
2017	292.3	261.2	130.0	22.4	1.4	0.0	0.0	0.0	1.8	7.0	7.9	13.2	737.2
PROM	64.4	78.5	84.1	25.5	1.2	0.2	0.0	0.4	1.2	9.0	15.0	42.2	

Tabla 8.2 Precipitación acumulada de la Estación Matucana (Fuente: SENAMHI)

ESTACIÓN CHOSICA

ESTACION	CHOSICA/151209	LAT	11° 55' 47.5"	DPTO	LIMA
PARAMETRO	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	LOG	76° 41' 22.8"	PROV	LIMA
		ALT	906 msnm	DIST	LURIGANCHO

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	4.6	0.0	4.7	0.0	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	3.2	14.8
1991	0.3	2.9	7.8	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.5	14.0
1992	0.3	2.9	1.5	0.3	0.8	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	1.4	7.6
1993	0.0	1.3	5.5	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.8	3.0	14.6
1994	22.7	9.7	5.0	2.5	0.4	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.4	2.3	44.0
1995	9.5	0.5	2.5	2.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.3	2.1	0.0	19.6
1996	6.0	8.0	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	32.8
1997	0.9	8.8	7.8	2.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	1.4	22.2
1998	7.0	12.9	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.3
1999	7.5	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.6
2000	20.7	8.1	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.0
2001	6.2	7.2	10.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	25.7
2002	1.6	30.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	35.0
2003	1.5	10.3	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	21.5
2004	0.8	0.6	1.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	5.5
2005	2.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	5.9
2006	9.4	9.0	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	29.3
2007	2.2	3.0	2.8	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.7
2008	7.3	12.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9
2009	8.2	24.3	17.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.9
2010	0.0	0.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
2011	6.7	7.0	1.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	5.1	23.8
2012	6.0	9.1	2.8	26.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.4	1.0	46.8
2013	0.0	1.8	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	5.0
2014	4.2	2.3	11.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.5	20.1
2015	1.8	10.5	29.6	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	45.1
2016	0.7	4.7	0.4	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	8.8
2017	37.3	10.1	30.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	78.1
PROM	6.3	8.3	6.7	2.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	1.3	

Tabla 8.3 Precipitación acumulada de la Estación Chosica (Fuente: SENAMHI)

ESTACIÓN SANTA EULALIA

ESTACION	SANTA AULALIA/155213	LAT	11° 55' 4.9"	DPTO	LIMA
PARAMETRO	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	LOG	76° 40' 0.4"	PROV	HUAROCHIRI
		ALT	934 msnm	DIST	SANTA EULALIA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	4.5	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.5	19.1
1991	0.0	1.8	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.8
1992	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
1993	0.5	2.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6
1994	19.0	7.4	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1.6	32.2
1995	7.5	0.0	2.5	1.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	2.1	0.0	14.6
1996	5.9	11.7	13.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	31.8
1997	3.0	4.3	0.4	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6	0.9	13.4	22.8
1998	18.7	16.9	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	5.4	59.3
1999	8.8	57.0	2.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	1.3	70.2
2000	19.1	11.9	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	35.3
2001	12.7	12.1	12.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.2	0.0	39.4
2002	1.2	33.3	3.5	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.5	39.3
2003	8.9	11.2	9.3	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4	45.3
2004	0.0	5.6	6.7	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	3.3	18.2
2005	1.8	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	6.5
2006	10.9	16.8	8.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.4	6.2	44.8
2007	5.3	3.6	5.4	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0	20.0
2008	12.7	15.0	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.8	48.7
2009	17.9	29.5	10.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.0	2.1	65.2
2010	6.3	1.2	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	5.1	19.3
2011	10.8	7.6	2.9	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	6.9	32.5
2012	0.0	17.4	7.2	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.5	1.5	38.8
2013	0.0	7.6	3.7	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	21.4
2014	3.7	6.4	11.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	5.7	29.0
2015	6.1	13.5	39.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	60.8
2016	0.5	8.5	1.2	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	14.6
2017	64.4	8.2	52.1	0.0	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	130.6
PROM	8.9	11.2	9.3	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	3.1	

Tabla 8.4 Precipitación acumulada de la Estación Santa Eulalia (Fuente: SENAMHI)

ESTACIÓN CANCHACALLA

ESTACION	CANCHACALLA/151205	LAT	11° 50' 41.3"	DPTO	LIMA
PARAMETRO	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	LOG	76° 31' 52.9"	PROV	HUAROCHIRI
		ALT	2400 msnm	DIST	SAN MATEO DE OTAO

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	1.7	0.7	3.2	7.6	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	14.3	21.4	53.9
1991	11.9	20.7	126.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.7	12.2	0.0	182.6
1992	0.0	11.8	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	0.0	4.6	37.8
1993	63.7	40.4	123.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	4.2	26.6	259.7
1994	91.3	70.3	49.4	21.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	7.1	240.2
1995	26.0	8.7	44.4	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	9.4	33.9	127.9
1996	49.0	73.4	32.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	7.8	162.9
1997	22.7	36.9	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	5.3	23.0	90.3	191.7
1998	168.5	143.4	149.8	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68.5	550.3
1999	94.9	341.2	89.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.6	0.0	83.8	633.0
2000	141.1	108.9	42.3	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	24.6	347.6
2001	76.2	67.3	94.8	50.8	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	45.8	5.8	363.7
2002	18.1	85.3	68.1	41.1	3.4	0.0	0.0	0.0	7.0	41.8	27.4	7.3	299.5
2003	20.4	25.1	98.8	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.2	243.9
2004	14.3	147.0	84.7	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	7.4	0.0	49.7	346.5
2005	52.4	77.2	41.6	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	0.0	85.1	267.4
2006	133.7	181.8	174.5	87.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	89.7	670.1
2007	54.0	29.6	199.9	54.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	15.1	357.7
2008	133.3	108.9	79.3	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	19.3	367.8
2009	88.2	87.6	114.6	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.8	20.6	17.0	356.0
2010	15.3	49.8	46.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46.8	158.1
2011	72.7	56.2	46.2	17.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.2	36.0	237.9
2012	14.9	61.4	176.3	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	6.6	8.3	37.7	331.6
2013	9.8	147.3	161.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	11.2	53.2	392.4
2014	53.1	65.8	110.4	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	15.6	43.0	301.9
2015	60.1	128.2	192.5	7.4	0.0	0.0	0.0	0.3	2.8	4.6	5.5	28.8	430.2
2016	15.9	60.9	59.7	39.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5	195.8
2017	257.4	246.9	321.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	37.7	868.0
PROM	62.9	88.7	98.1	16.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.7	6.6	8.3	37.7	

Tabla 8.5 Precipitación acumulada de la Estación Canchacalla (Fuente: SENAMHI)

ESTACIÓN SANTIAGO DE TUNA

ESTACION	SANTIAGO DE TUNA/155224	LAT	11° 59' 0"	DPTO	LIMA
PARAMETRO	PRECIPITACION ACUMULADA (mm)	LOG	76° 31' 0"	PROV	HUAROCHIRI
		ALT	2921 msnm	DIST	SANTIAGO DE TUNA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1990	15.8	5.9	42.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	10.0	142.9	219.3
1991	64.9	7.2	169.7	4.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	32.3	0.6	283.1
1992	6.4	3.8	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	3.3	22.1
1993	13.1	219.3	111.3	19.6	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	41.9	407.2
1994	84.0	88.0	62.4	6.1	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.7	37.3	289.7
1995	41.6	32.5	63.2	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	40.1	23.0	212.7
1996	70.9	92.5	63.1	23.5	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	8.5	268.5
1997	40.8	41.4	21.3	10.1	0.0	0.0	0.0	1.5	9.2	10.6	21.2	62.1	218.2
1998	68.4	135.7	135.4	8.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	106.3	456.3
1999	46.8	113.5	50.0	33.0	6.2	0.0	0.0	0.0	0.6	13.2	10.0	27.0	300.3
2000	74.5	132.0	83.9	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	5.7	6.2	29.7	354.0
2001	80.7	86.6	102.5	46.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	26.2	1.3	344.1
2002	13.5	124.8	68.3	47.0	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7	25.3	15.7	314.1
2003	24.3	31.3	54.9	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	2.2	1.0	80.8	197.4
2004	9.5	91.1	31.3	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.4	2.0	31.4	196.8
2005	29.0	54.0	89.7	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	42.3	222.3
2006	65.7	96.6	77.3	60.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	38.6	340.8
2007	22.4	53.3	107.8	52.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.9	18.4	266.2
2008	75.3	171.1	190.0	82.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	3.6	11.4	35.7	570.2
2009	127.2	160.9	174.7	52.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	12.5	14.2	554.7
2010	18.9	32.5	35.3	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	6.1	27.4	137.1
2011	80.1	64.8	66.5	27.4	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	12.3	11.0	266.0
2012	46.3	118.7	97.5	35.7	3.4	0.0	0.0	0.0	1.8	13.9	4.3	21.8	343.3
2013	15.0	129.6	75.1	2.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	1.8	233.4
2014	47.7	65.7	135.9	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.4	29.6	304.6
2015	61.1	93.0	210.0	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	2.4	2.4	386.5
2016	15.9	55.6	44.5	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	157.6
2017	334.6	278.3	371.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	987.9
PROM	56.9	92.1	98.0	23.1	1.2	0.0	0.2	0.1	0.6	3.2	10.0	30.7	

Tabla 8.6 Precipitación acumulada de la Estación Santiago de Tuna (Fuente: SENAMHI)

ANEXO C

Calculo del Factor R

ESTACIÓN RÍO BLANCO

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R
1990	40.81	2.11	0.00	1.19	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	216.22	175.84	436.28
1991	0.59	80.91	807.50	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	2.18	0.04	6.68	898.00
1992	1.44	10.48	27.59	17.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	49.47	3.53	5.48	115.35
1993	237.05	177.69	2.49	13.78	0.02	0.00	0.00	0.00	0.46	1.09	29.08	184.14	645.81
1994	102.00	489.32	166.63	14.14	0.06	0.01	0.00	0.06	0.62	0.34	9.43	21.35	803.98
1995	6.78	89.45	111.12	50.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	1.72	15.21	39.24	313.97
1996	27.93	325.63	56.34	16.85	0.02	0.00	0.08	0.00	0.02	1.71	0.52	4.04	433.15
1997	59.83	467.97	0.97	0.23	0.02	0.00	0.00	0.00	5.53	3.92	5.74	127.92	672.13
1998	198.69	213.97	150.97	2.86	0.00	0.00	0.00	0.00	2.24	8.34	4.89	11.79	593.75
1999	72.06	522.97	67.21	11.53	2.62	0.00	0.00	0.00	0.57	2.87	28.09	140.23	848.15
2000	181.91	163.22	654.46	0.15	0.35	0.00	0.00	0.04	0.08	15.88	1.46	238.90	1256.45
2001	482.76	127.90	541.12	1.69	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01	1.13	38.48	13.74	1206.90
2002	75.03	109.28	163.30	15.39	0.66	0.00	0.00	0.00	1.10	7.53	26.67	73.84	472.80
2003	204.25	148.90	872.33	6.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.18	0.03	116.97	1355.45
2004	5.52	113.38	46.09	7.06	0.14	0.08	0.00	0.00	1.63	26.98	44.35	326.64	571.88
2005	135.83	45.25	266.49	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.45	160.92	609.50
2006	76.37	83.80	704.55	7.29	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09	3.07	26.55	110.70	1012.46
2007	216.46	408.15	359.06	5.74	0.01	0.00	0.00	0.00	0.35	0.35	1.38	49.57	1041.06
2008	314.92	185.64	71.05	1.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.71	4.50	125.47	706.90
2009	121.92	345.48	104.05	9.22	0.32	0.00	0.00	0.03	0.02	10.38	104.05	27.18	722.63
2010	234.59	79.93	230.94	4.87	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	2.13	2.89	233.02	788.37
2011	273.71	165.55	188.28	49.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	7.89	126.38	811.36
2012	39.28	337.46	104.11	131.58	0.03	0.00	0.00	0.00	1.45	8.48	24.28	49.73	696.41
2013	70.25	194.33	291.10	5.01	2.16	0.00	0.00	0.08	0.03	2.62	5.10	81.53	652.20
2014	129.96	54.12	216.94	7.91	0.01	0.00	0.05	1.14	0.37	10.02	13.12	140.05	573.70
2015	184.43	67.11	207.34	8.77	0.12	0.21	0.00	0.78	0.37	2.05	9.20	28.48	508.86
2016	6.48	405.57	80.85	4.53	0.00	0.00	0.00	0.00	14.41	1.56	0.00	99.97	613.37
2017	351.14	750.07	261.70	15.33	1.72	0.00	0.00	0.00	0.12	7.85	1.67	12.03	1401.64

Tabla 8.7 Calculo del factor R para la Estación Río Blanco (Fuente: Elaboración Propia)

ESTACIÓN MATUCANA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R
1990	85.70	0.07	4.61	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	29.06	47.90	168.93
1991	0.84	91.55	648.81	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.36	0.04	0.04	744.30
1992	9.57	6.00	405.42	7.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.59	0.03	4.04	444.89
1993	90.11	374.88	299.23	11.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.29	5.98	90.39	873.84
1994	73.24	231.88	25.40	9.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	36.81	377.65
1995	75.76	9.65	71.84	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.22	12.14	19.47	203.39
1996	116.81	160.49	208.17	6.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	491.78
1997	57.11	76.96	0.49	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	1.73	71.19	207.75
1998	156.75	281.96	378.61	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61	819.94
1999	37.52	873.15	32.10	2.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.40	1.44	5.47	954.01
2000	123.11	255.99	68.33	2.30	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	27.41	478.29
2001	345.95	59.90	290.55	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.41	0.00	712.53
2002	1.82	132.58	76.66	10.99	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.23	3.54	25.52	251.43
2003	12.63	36.49	98.74	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	239.30	388.62
2004	0.29	114.55	53.71	8.37	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	3.17	221.57	401.74
2005	145.81	10.39	108.19	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	63.03	327.72
2006	93.91	49.66	357.06	23.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	68.49	593.11
2007	91.50	50.57	676.74	6.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	4.47	829.49
2008	103.29	339.01	90.33	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.56	11.67	545.57
2009	163.70	134.86	310.55	4.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	7.18	18.93	640.70
2010	12.91	113.36	80.93	2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.57	48.40	258.70
2011	25.94	30.71	21.46	20.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	15.05	115.44
2012	2.87	165.83	175.32	41.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	5.48	1.48	9.48	401.71
2013	6.43	176.72	159.21	5.49	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.60	13.66	362.40
2014	30.96	14.48	100.33	2.59	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.38	0.84	123.11	272.70
2015	89.87	17.32	929.43	7.31	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.94	8.66	1053.57
2016	0.68	147.29	78.62	3.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	11.43	241.06
2017	1792.80	1279.06	157.90	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.16	3230.79

Tabla 8.8 Calculo del factor R para la Estación Matucana (Fuente: Elaboración Propia).

ESTACIÓN CHOSICA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R
1990	2.46	0.00	2.62	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.83	5.95
1991	0.00	0.67	13.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	13.75
1992	0.00	1.67	0.23	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	2.13
1993	0.00	0.06	4.29	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.70	5.75
1994	57.59	4.49	0.62	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	62.84
1995	14.20	0.00	0.26	0.13	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	14.92
1996	1.65	3.92	47.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.22
1997	0.01	9.53	6.64	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	16.42
1998	3.88	24.23	1.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.89
1999	2.43	190.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	193.15
2000	67.23	4.03	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.82
2001	2.63	4.12	13.51	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.27
2002	0.03	200.79	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	200.84
2003	0.05	15.75	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.53	20.68
2004	0.06	0.02	0.38	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	1.50
2005	1.22	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	2.40
2006	7.52	6.60	2.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	17.69
2007	0.25	0.62	0.51	10.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.92
2008	5.85	26.64	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.54
2009	2.12	55.14	21.67	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.94
2010	0.00	0.03	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67
2011	3.72	4.24	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	1.64	9.86
2012	0.95	3.35	0.10	83.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	87.98
2013	0.00	0.71	1.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	2.71
2014	1.16	0.19	23.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	25.03
2015	0.03	5.46	123.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	128.60
2016	0.02	5.90	0.00	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.18
2017	107.63	2.16	60.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	170.25

Tabla 8.9 Calculo del factor R para la Estación Chosica (Fuente: Elaboración Propia).

ESTACIÓN SANTA EULALIA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R
1990	1.57	0.00	17.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.74	20.06
1991	0.00	0.24	29.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.75
1992	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51
1993	0.01	0.87	3.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.11
1994	53.94	3.19	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	57.62
1995	10.87	0.00	0.40	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.24	0.00	11.55
1996	1.65	12.83	17.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	32.09
1997	0.36	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	31.76	33.18
1998	20.58	15.19	18.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	54.92
1999	1.66	452.42	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	454.12
2000	47.74	11.55	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.72
2001	11.90	10.29	10.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	32.26
2002	0.01	215.36	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	215.62
2003	3.36	6.65	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.07	27.89
2004	0.00	3.25	5.57	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	9.65
2005	0.51	2.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	3.27
2006	6.21	22.72	3.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.14	33.24
2007	2.39	0.75	2.53	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	6.80
2008	8.66	14.27	23.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	46.83
2009	15.65	70.07	3.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.03	89.36
2010	4.24	0.03	3.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.25	9.66
2011	9.77	3.40	0.19	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	2.55	16.14
2012	0.00	31.32	2.22	6.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	40.10
2013	0.00	6.37	0.74	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.94	18.06
2014	0.47	2.41	13.28	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	17.88
2015	0.69	7.46	189.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	197.80
2016	0.00	15.82	0.04	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	16.99
2017	257.14	0.53	136.15	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	394.01

Tabla 8.10 Calculo del factor R para la Estación Santa Eulalia (Fuente: Elaboración Propia)

ESTACIÓN CANCHACALLA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R
1990	0.02	0.00	0.12	1.59	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.62	35.59	48.17
1991	0.98	5.17	1167.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	1.06	0.00	1175.79
1992	0.00	10.16	5.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.16	0.00	0.60	26.39
1993	88.74	22.64	643.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	6.46	761.45
1994	293.75	134.10	46.53	3.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	478.19
1995	17.46	0.65	86.95	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	38.70	144.74
1996	81.31	273.29	23.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	378.00
1997	6.33	27.20	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.08	6.59	398.61	439.15
1998	532.50	328.22	374.16	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.78	1271.56
1999	77.11	3583.78	64.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	0.00	53.09	3779.85
2000	622.85	286.34	16.78	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	3.30	930.87
2001	91.66	63.15	176.49	27.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	19.90	0.04	379.67
2002	1.64	172.06	87.55	19.25	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	20.25	5.70	0.11	306.66
2003	3.20	5.97	363.81	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	325.47	698.48
2004	0.65	707.65	135.37	14.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	27.35	885.37
2005	47.28	151.21	23.66	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	202.54	424.81
2006	197.97	497.73	440.15	56.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.78	1251.70
2007	33.44	5.51	1696.60	35.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.73	1771.44
2008	482.49	263.08	101.58	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	1.46	850.07
2009	146.77	143.80	321.96	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.66	1.87	1.05	617.23
2010	2.59	89.27	71.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.09	237.23
2011	150.46	69.51	38.61	2.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	18.27	279.30
2012	0.79	55.09	1304.09	3.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.14	12.75	1376.91
2013	0.17	590.79	771.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.26	27.83	1390.66
2014	41.01	78.04	368.58	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.04	21.78	510.65
2015	34.96	339.30	1148.70	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	3.85	1526.91
2016	2.11	118.45	111.59	33.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.89	269.10
2017	958.23	845.68	1863.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.01	3670.62

Tabla 8.11 Calculo del factor R para la Estación Canchacalla (Fuente: Elaboración Propia).

ESTACIÓN SANTIAGO DE TUNA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R
1990	1.75	0.09	33.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	1291.10	1326.39
1991	82.46	0.11	1474.20	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	10.17	0.00	1566.98
1992	3.63	0.76	6.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.50	11.45
1993	0.39	1844.27	241.10	1.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.86	2099.94
1994	172.72	198.58	70.80	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	15.12	457.65
1995	33.35	15.90	116.93	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.87	5.64	202.20
1996	116.40	258.48	82.05	4.24	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	461.52
1997	30.28	31.63	4.31	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.53	4.25	106.76	178.57
1998	47.18	368.37	365.93	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	177.07	958.63
1999	28.30	403.71	34.51	9.92	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.28	5.43	482.87
2000	89.20	496.18	127.41	1.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	5.65	720.42
2001	118.31	146.20	242.42	22.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.05	0.00	533.17
2002	0.64	501.72	82.24	26.80	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	4.18	1.00	617.18
2003	7.43	15.89	85.73	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	273.30	382.36
2004	0.45	393.49	15.96	12.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.11	438.98
2005	10.57	68.25	312.96	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	32.80	424.63
2006	64.77	205.87	105.49	50.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.14	440.09
2007	3.72	50.09	414.44	47.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	2.06	517.80
2008	45.10	528.80	724.32	58.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	4.81	1361.69
2009	226.22	458.51	586.56	16.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.21	0.32	1288.20
2010	6.06	30.58	39.45	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	18.45	98.21
2011	170.32	90.07	97.24	6.83	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.62	0.44	365.54
2012	22.48	377.47	209.19	10.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.02	2.34	622.37
2013	1.35	876.53	170.56	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	1048.55
2014	29.25	76.78	678.45	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.66	6.99	794.15
2015	43.06	152.29	1751.83	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1947.77
2016	2.93	124.59	64.20	36.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	227.89
2017	1733.01	997.31	2371.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5101.95

Tabla 8.12 Calculo del factor R para la Estación Matucana (Fuente: Elaboración Propia).

ANEXO D

Instalación y Operación del Simulador



a)



b)



c)



d)

Figura 8.5 Instalación y operación del simulador: a) Instalación de la base metálica y nivelación con las patas de aluminio regulables, b) Colocación de las fronteras de simulación, la transición guía y el recipiente receptor de muestras, c) Llenado del contenedor de agua mediante una manguera, d) Toma de datos iniciales antes de la simulación. Lugar: San Miguel de Viso – Huarochirí.



Figura 8.6 Final de la simulación: a) Destapar el extremo del tubo aireador para dar inicio a la simulación, b) Recolección de la muestra de sedimento y agua.

ANEXO E

Pesado y Secado de las Muestras de Simulaciones



a)



b)



c)

Figura 8.7 Proceso de secado y pesado de muestras en laboratorio: a) Balanza y muestra en recipiente sin fugas, b) Se vierte el recipiente en su totalidad (agua y sedimento) en la bandeja de secado, c) Se procede a secar la muestra en su totalidad.



a)



b)



c)



d)

Figura 8.8 Proceso de secado y pesado de muestras en laboratorio: a) Se introduce la bandeja al horno, b) Horno para secado de muestras, c) Pesado del recipiente más la muestra seca, d) Pesado del recipiente solo para calcular el peso de la muestra.

ANEXO F

Tipos de Cobertura Vegetal Encontradas



Figura 8.9 Formaciones rocosas, Puente Verugas - Huarochirí (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 8.10 Cobertura Natural – Huariquiña, Huarochirí (Fuente: elaboración propia)



Figura 8.11 Pastos Naturales y Zona urbana – San Jerónimo de Surco (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 8.12 Miles de hectáreas de cultivos de tuna, Cocachacra – Huarochirí (Fuente: Elaboración propia).



Figura 8.13 Suelo erosionable desnudo, Cocachacra - Huarochirí (Fuente: Elaboración propia).



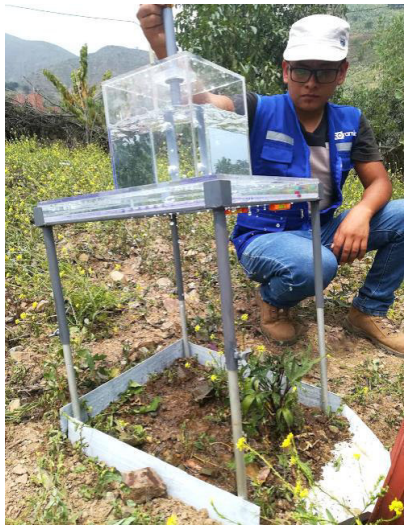
Figura 8.14 Área agrícola o cultivo a nivel, San Bartolomé – Huarochirí (Fuente: Elaboración propia).

ANEXO G

Puntos de Simulación en Campo


SIMULACIÓN 01

CODIGO: PC010604	
UBICACIÓN	
Departamento:	Lima
Provincia:	Huarocharí
Distrito:	Santa Cruz de Cocachacra
COORDENADAS (UTM - Zona 18S)	
Norte	8681893
Este	331938
Altitud	1489
PARÁMETROS	
Fecha:	6/4/2018
Hora:	12:49
Temperatura:	22°
Humedad:	63%
Prob. de precipitación:	0%




SIMULACIÓN 02

CODIGO: PC022104	
UBICACIÓN	
Provincia:	Huarocharí
Distrito:	Santa Cruz de Cocachacra
Localidad:	San Miguel de Viso
COORDENADAS (UTM - Zona 18S)	
Norte	8694609
Este	355428
Altitud	3096
PARÁMETROS	
Fecha:	21/4/2018
Hora:	10:43
Temperatura:	15°
Humedad:	66%
Prob. de precipitación:	1%




SIMULACIÓN 03

CODIGO: PC032104	
UBICACIÓN	
Departamento:	Lima
Provincia:	Huarocharí
Distrito:	Matucana
COORDENADAS (UTM - Zona 18S)	
Norte	8690545
Este	349961
Altitud	2495
PARÁMETROS	
Fecha:	21/4/2018
Hora:	13:00
Temperatura:	19°
Humedad:	65%
Prob. de precipitación:	1%



SIMULACIÓN 04

CODIGO: PC042104	
UBICACIÓN	
Departamento:	Lima
Provincia:	Huarocharí
Distrito:	Ricardo Palma
COORDENADAS (UTM - Zona 18S)	
Norte	8681444
Este	324651
Altitud	1270
PARÁMETROS	
Fecha:	21/4/2018
Hora:	14:29
Temperatura:	25°
Humedad:	69%
Prob. de precipitación:	0%



SIMULACIÓN 05

CODIGO: PC052204	
UBICACIÓN	
Departamento:	Lima
Provincia:	Huarocharí
Distrito:	San Mateo de Otao - Cumbe
COORDENADAS (UTM - Zona 18S)	
Norte	8684713
Este	330822
Altitud (msnm)	1667
PARÁMETROS	
Fecha:	22/4/2018
Hora:	11:19
Temperatura:	23°
Humedad:	67%
Prob. de precipitación:	1%



SIMULACIÓN 06

CODIGO: PC062204	
UBICACIÓN	
Departamento:	Lima
Provincia:	Huarocharí
Distrito:	Ricardo Palma - Corcona
COORDENADAS (UTM - Zona 18S)	
Norte	8682669
Este	324431
Altitud (msnm)	1152
PARÁMETROS	
Fecha:	22/4/2018
Hora:	13:05
Temperatura:	26°
Humedad:	65%
Prob. de precipitación:	0%



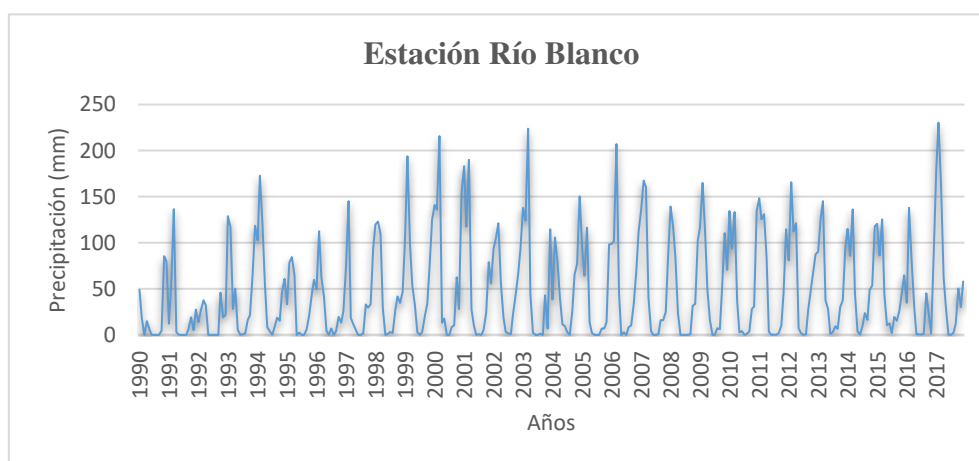
ANEXO H

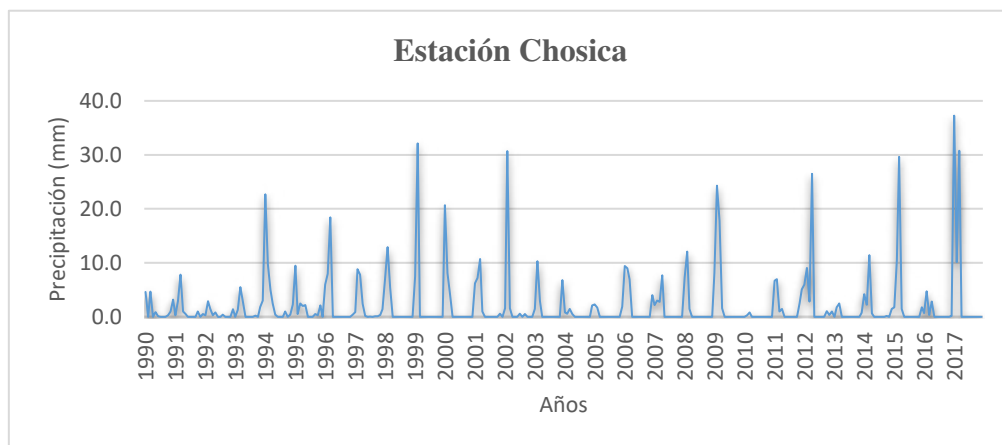
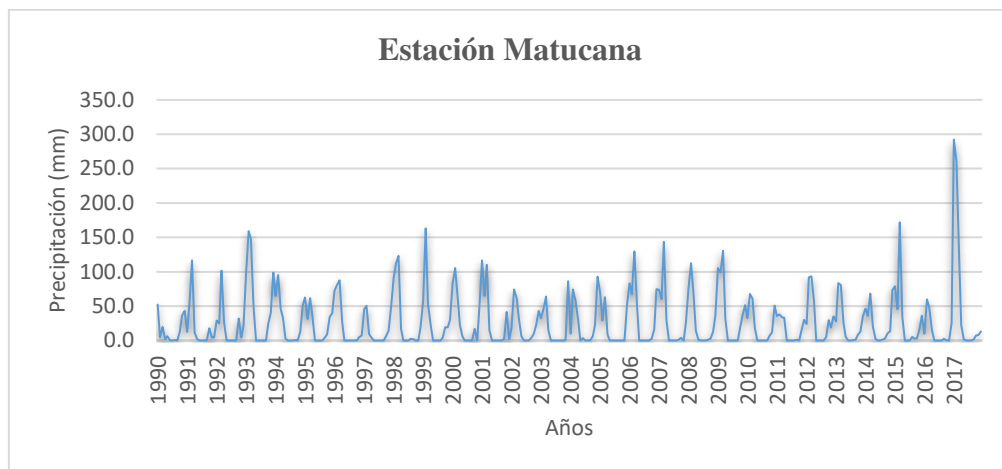
Análisis de Consistencia de la Información

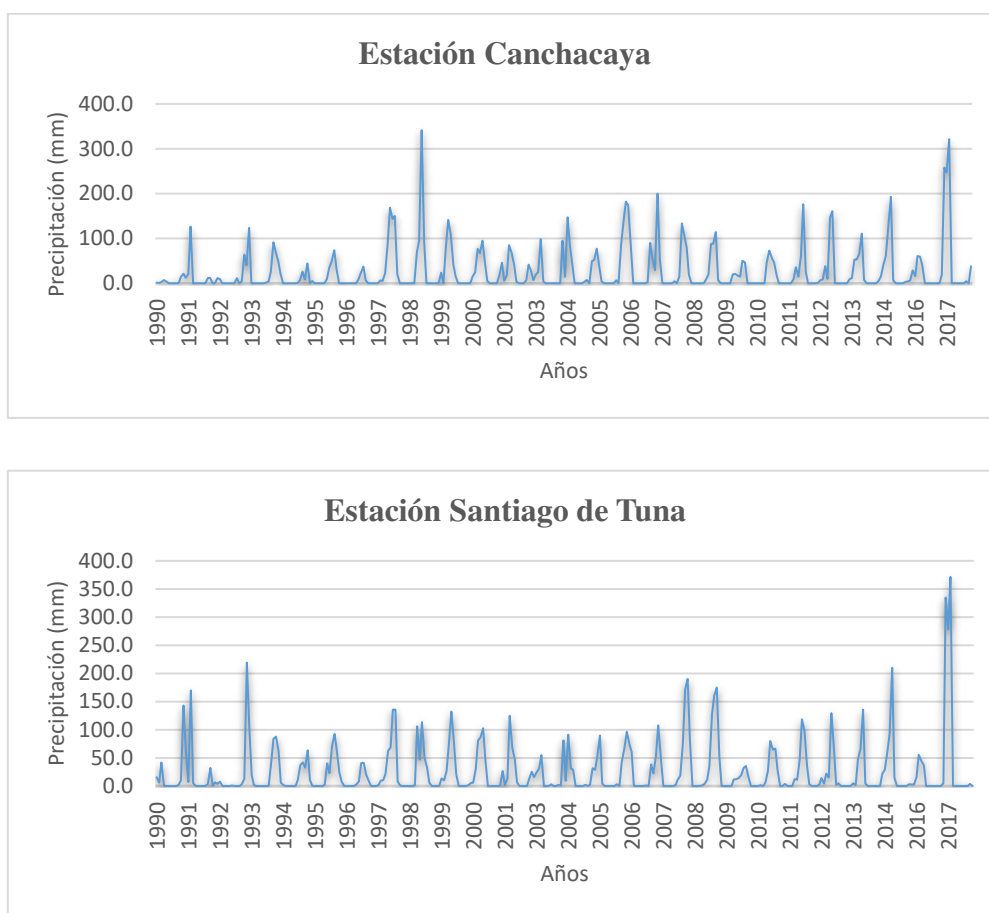
1. Análisis Visual Gráfico

En coordenadas cartesianas se plotea la información hidrológica histórica (precipitación), ubicándose en las ordenadas, los valores de la serie y en las abscisas el tiempo (años, meses, días, etc).

Estos gráficos sirven para analizar la consistencia de la información hidrológica en forma visual, e indicar el periodo o periodos en los cuales la información es dudosa, lo cual se puede reflejar como “picos” muy altos o valores muy bajos, **saltos y/o tendencias** (Villón Béjar, 2016).







En este análisis las estaciones en cuestión presentaron información confiable ya que no se observan saltos ni tendencias en su desarrollo¹⁹.

Siguiendo con la comparativa entre estaciones cercanas se pudo observar un comportamiento similar, una con respecto a la otra. Esta comparación se realizó entre las estaciones Chosica con Santa Eulalia (**Gráfico 8.1**) y las de Santiago de Tuna con Canchacaya²⁰ (**Gráfico 8.2**).

¹⁹ Se visualiza un pico de precipitaciones en el año 2017, año en que el “Fenómeno del Niño” azotó gran parte de esta cuenca, eventos de gran intensidad produjeron deslizamientos, inundaciones y huaicos en los distritos de Santa Eulalia, Lurigancho-Chosica, Ricardo Palma, Corcona y Chaclacayo.

²⁰ No se comparó la estación Río Blanco con la estación Matucana ya que se encuentran muy alejadas en cuanto a altura y elevación.



Gráfico 8.1 Comparación de gráficos de series históricas entre las estaciones de Santa Eulalia y Chosica.



Gráfico 8.2 Comparación de gráficos de series históricas entre las estaciones de Santiago de Tuna y Canchacaya.

2. Análisis Doble Masa

Este análisis se realiza para tener una cierta confiabilidad en la información, así como también, para analizar la consistencia en lo relacionado a errores, que pueden producirse durante la obtención de los mismo, y no para corrección a partir de la recta doble masa (Villón Béjar, 2016).

A continuación, se muestra el ploteo del análisis doble masa para las estaciones agrupadas:

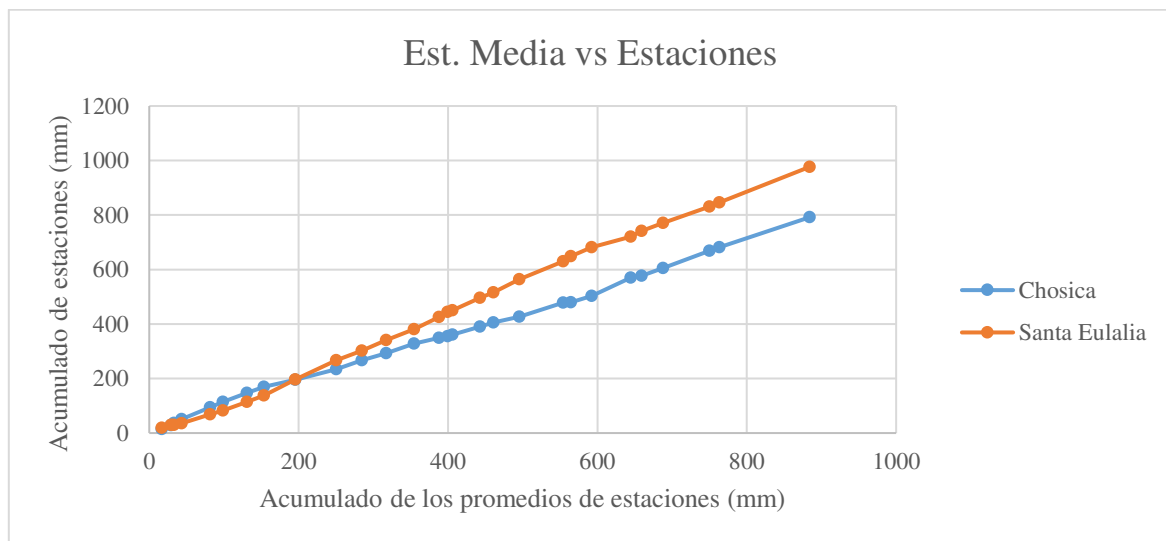


Gráfico 8.3 Análisis doble masa para identificar la estación base entre la estación Chosica y Santa Eulalia.

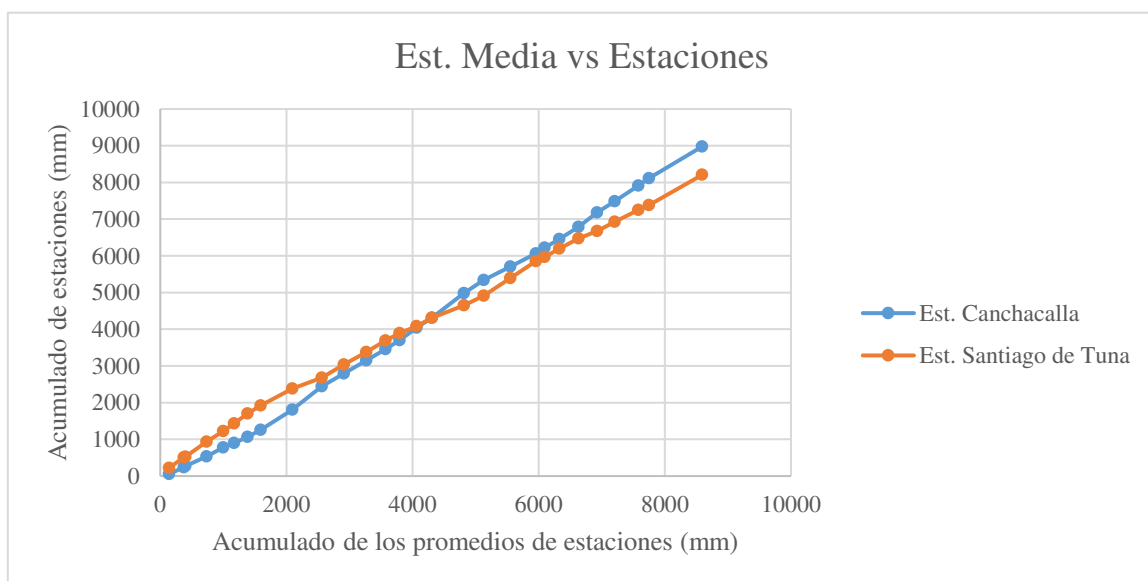


Gráfico 8.4 Análisis doble masa para identificar la estación base entre la estación Canchacalla y Santiago de Tuna.

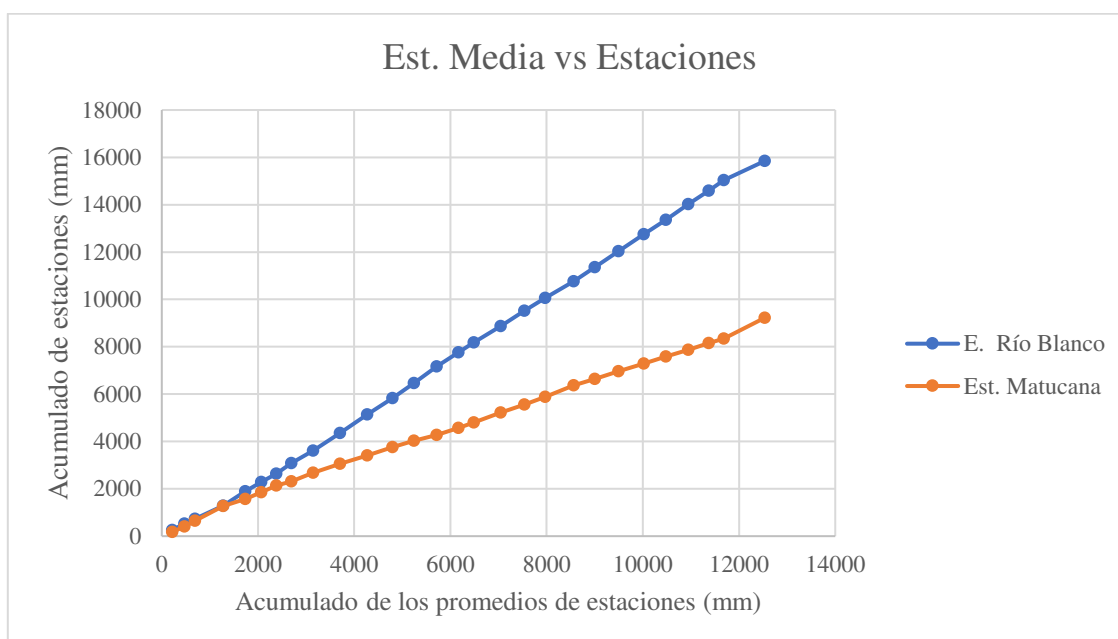


Gráfico 8.5 Análisis doble masa que muestra comportamientos diferentes de las estaciones, ya que estas se encuentran muy distanciadas entre sí.

De estos análisis se eligieron como índices a la estación meteorológica Santa Eulalia (*Gráfico 8.3*) y a la estación Canchacalla (*Gráfico 8.4*).

Una vez seleccionada la estación índice, se vuelve a construir el diagrama de doble masa colocando en el eje de las abscisas la estación índice (estación base) y en el de las ordenadas la estación en estudio. Este último análisis permite determinar el rango de periodos dudosos y confiables para cada estación en estudio, la cual se deberá corregir utilizando ciertos criterios estadísticos.

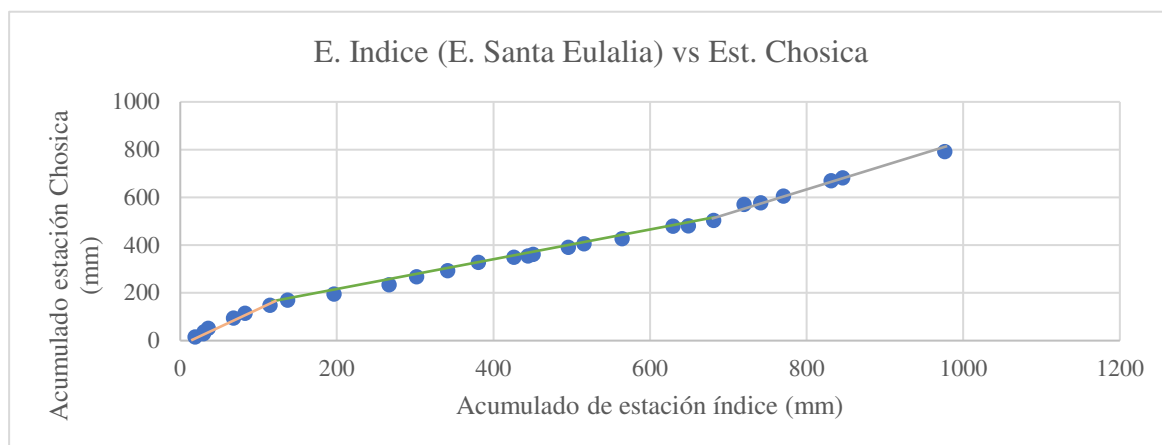


Gráfico 8.6 Análisis doble masa para obtener los periodos de estudio de la estación Chosica.

En este gráfico doble masa se detectan ligeros quiebres entre los periodos 1990-1997, 1998-2011 y 2012-2017, los cuales se someterán a un análisis estadístico para su posterior corrección de ser el caso.

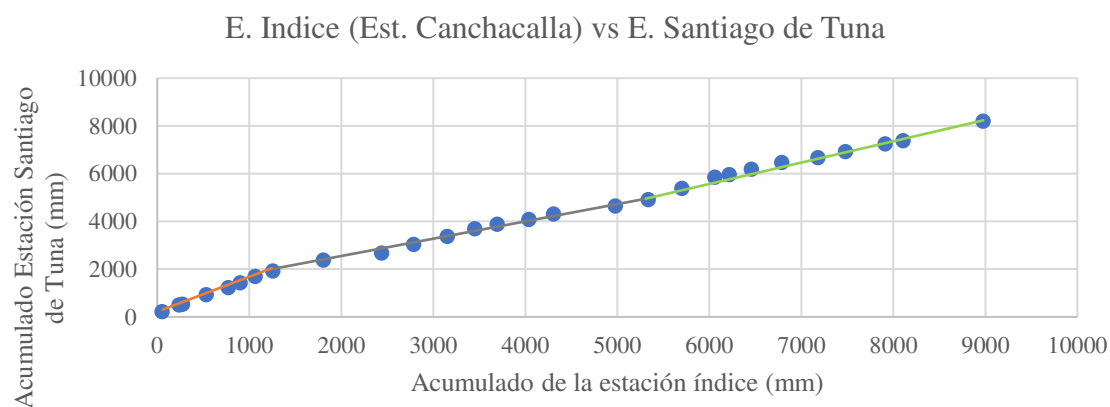


Gráfico 8.7 Análisis doble masa para obtener los periodos de estudio de la estación Santiago de Tuna.

En este gráfico doble masa se detectan ligeros quiebres entre los periodos 1990-1997, 1998-2007 y 2008-2017, los cuales se someterán a un análisis estadístico para su posterior corrección de ser el caso.

3. Completación de datos faltantes

Coeficiente de Correlación:

$$R = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{(n-1)\sigma_X\sigma_Y} \quad (8.1)$$

Desviación estándar:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (8.2)$$

Varianzas:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n} \quad \sigma_Y^2 = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{n} \quad (8.3)$$

Covarianza:

$$\sigma_{XY} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{n} \quad (8.4)$$

Ecuación de Regresión:

$$Y = a + bX \quad (8.5)$$

Donde:

$$a = \bar{Y} - \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X^2} \bar{X} \quad b = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X^2} \quad (8.6)$$

Como ejemplo, para la completación de los datos faltantes de los meses de abril y agosto del año 2004 de las estaciones de Río Blanco y Matucana correspondientemente, se tienen los

siguientes valores de precipitación mensual en tabla (*Tabla 8.13*), para luego evaluar el factor de correlación (>0.7 , indicativo de una buena correlación) se tiene la recta de regresión y finalmente los valores corregidos de dichos meses (*Gráfico 8.8*).

	R. BLANCO	MATUCANA
Enero	38.6	10.1
Febrero	105.7	74.4
Marzo	78.3	57.8
Abril	-	31.1
Mayo	11.4	0
Junio	9.5	3.6
Julio	3	0
Agosto	0	-
Setiembre	25.7	0
Octubre	65.5	6.3
Noviembre	77.3	22.5
Diciembre	150.4	92.7

Tabla 8.13 Valores de precipitación mensual de las estaciones de Río Blanco y Matucana en el año 2004 (Fuente: SENAMHI)

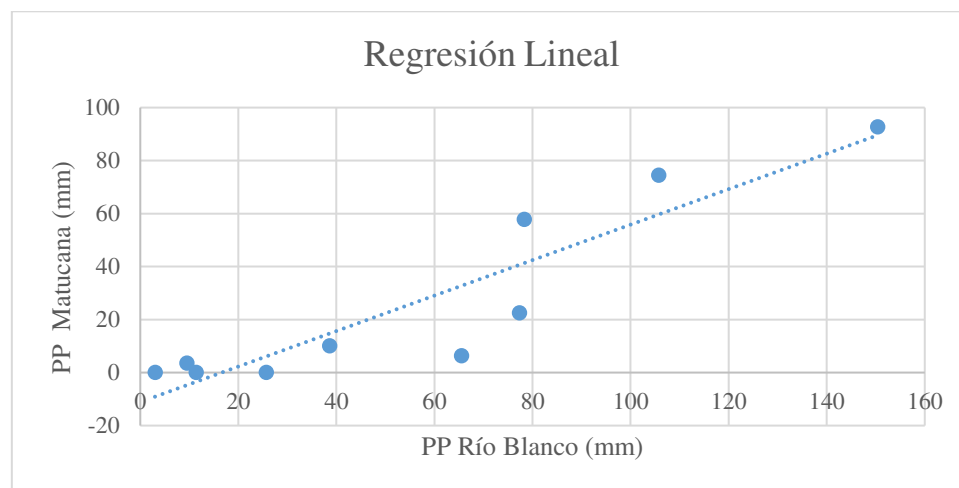


Gráfico 8.8 Línea de regresión lineal para completación de datos del año 2004 de las estaciones Río blanco y Matucana (Fuente: Elaboración propia)

Ecuación de regresión y valores que completan la serie de datos en las 2 estaciones:

$$y = 0.6024x - 7.3199 ; R=0.9168$$

Río Blanco – abril: 63.8 mm	Matucana – agosto: 0 mm
-----------------------------	-------------------------

4. Análisis Estadístico

Análisis de Saltos

1. Consistencia de la media

a. Cálculo de la media y desviación estándar para cada periodo, según:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i ; S_1(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.7)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} x_j ; S_2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.8)$$

b. Estadística T

Calculamos la desviación estándar de las diferencias de los promedios.

$$S_{\bar{d}} = S_p \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.9)$$

$$S_p = \left[\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.10)$$

Cálculo de Tc

$$T_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_{\bar{d}}} \quad \text{donde: } \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (\text{Por hipótesis}) \quad (8.11)$$

Hallar el valor de T_t en las tablas con:

N.C. = 95% de probabilidades

$$\alpha = 0.05$$

$$G.L. = n_1 + n_2 - 2$$

2. Consistencia de la desviación estándar

Se realiza con la prueba “F” de la forma que a continuación se describe

a. Cálculo de las varianzas de ambos periodos.

$$S_1^2(x) = \left(\frac{1}{n_1 - 1}\right) \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad (8.12)$$

$$S_2^2(x) = \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right) \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad (8.13)$$

b. Cálculo del F calculado (F_c), como sigue:

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)} \quad \text{si} \quad S_1^2(x) > S_2^2(x) \quad (8.14)$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)} \quad \text{si} \quad S_2^2(x) > S_1^2(x) \quad (8.15)$$

c. Cálculo del F tabular (F_t), con:

$$\alpha = 0.05$$

$$\begin{aligned} \text{G.L.N} &= n_1 - 1 \uparrow, \text{ si } S_1^2(x) > S_2^2(x) \\ \text{G.L.D} &= n_2 - 1 \downarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{G.L.N} &= n_2 - 1 \uparrow, \text{ si } S_2^2(x) > S_1^2(x) \\ \text{G.L.D} &= n_1 - 1 \downarrow \end{aligned}$$

d. Conclusiones

$$F_c \leq F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) = S_2(x) \text{ (estadísticamente)}$$

$$F_c \leq F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) \neq S_2(x) \text{ (estadísticamente), por lo que se debe corregir.}$$

3. Corrección de los datos hidrometeorológicos

Si la media y la desviación estándar resultan estadísticamente diferentes, entonces se corrige mediante una ecuación que permite mantener los parámetros del periodo más confiable, dicha ecuación se expresa como.

Corrección de un periodo 1

$$x'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_1}{S_1(x)} S_2(x) + \bar{x}_2 \quad (8.16)$$

$x'_{(t)}$ = valor corregido de la información; x_t = valor a ser corregido

Corrección de un periodo 2

$$x'_{(t)} = \frac{x_t - \bar{x}_2}{S_2(x)} S_1(x) + \bar{x}_1 \quad (8.17)$$

Análisis de Tendencias

1. Tendencia de la Media

Puede ser expresada en forma general por la ecuación polinomial:

$$T_m = A_m + B_m t + C_m t^2 + D_m t^3 + \dots \quad (8.18)$$

Y en forma particular por la ecuación de regresión lineal simple:

$$T_m = A_m + B_m t \quad (8.19)$$

Donde:

t = tiempo en años, tomado como la variable independiente de la tendencia

t = 1, 2, 3, ..., n

T_m = tendencia en la media, para este caso:

T_m = $X'_{(t)}$ valor corregido de saltos, es decir, datos a usarse para el cálculo de los parámetros

A_m, B_m, C_m, D_m, ... = coeficientes de los polinomios de regresión, que deben ser estimados con los datos

Los parámetros de regresión de estas ecuaciones, pueden ser estimados por el método de mínimos cuadrados, o por el método de regresión lineal múltiple.

El cálculo de la tendencia en la media, haciendo uso de la ecuación (7.19), se realiza mediante el siguiente proceso:

a. Cálculo de los parámetros de la ecuación de regresión lineal simple.

$$A_m = \bar{T}_m - \bar{t} \cdot B_m \quad (8.20)$$

$$B_m = R \cdot \frac{S_{T_m}}{S_t} \quad (8.21)$$

$$R = \frac{\overline{t \cdot T_m} - \bar{t} \cdot \overline{T_m}}{S_t \cdot S_{T_m}} \quad (8.22)$$

Donde:

$$\overline{T_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{m_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X'_{(t)_i} \quad (8.23)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

$$\overline{t \cdot T_m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \cdot T_{m_i}$$

$$S_{T_m} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m_i} - \overline{T_m})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$S_{T_m} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_{m_i} - \overline{T_m})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.24)$$

Además:

$\overline{T_m}$ = promedio de las tendencias T_m , o promedio de los datos corregidos de saltos $X'_{(t)}$

\bar{t} = promedio del tiempo t

S_{T_m} = desviación estándar de la tendencia de la media T_m

S_t = desviación estándar del tiempo t

b. Evaluación de la tendencia de T_m

Para averiguar si la tendencia es significativa, se analiza el coeficiente de regresión B_m o también el coeficiente de correlación R .

El análisis de R según el estadístico t , es como sigue:

1. Cálculo del estadístico t_c según:

$$t_c = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (8.25)$$

Donde:

t_c = valor del estadístico t calculado; n = número total de datos; R = coeficiente de correlación.

2. Cálculo de t_t :

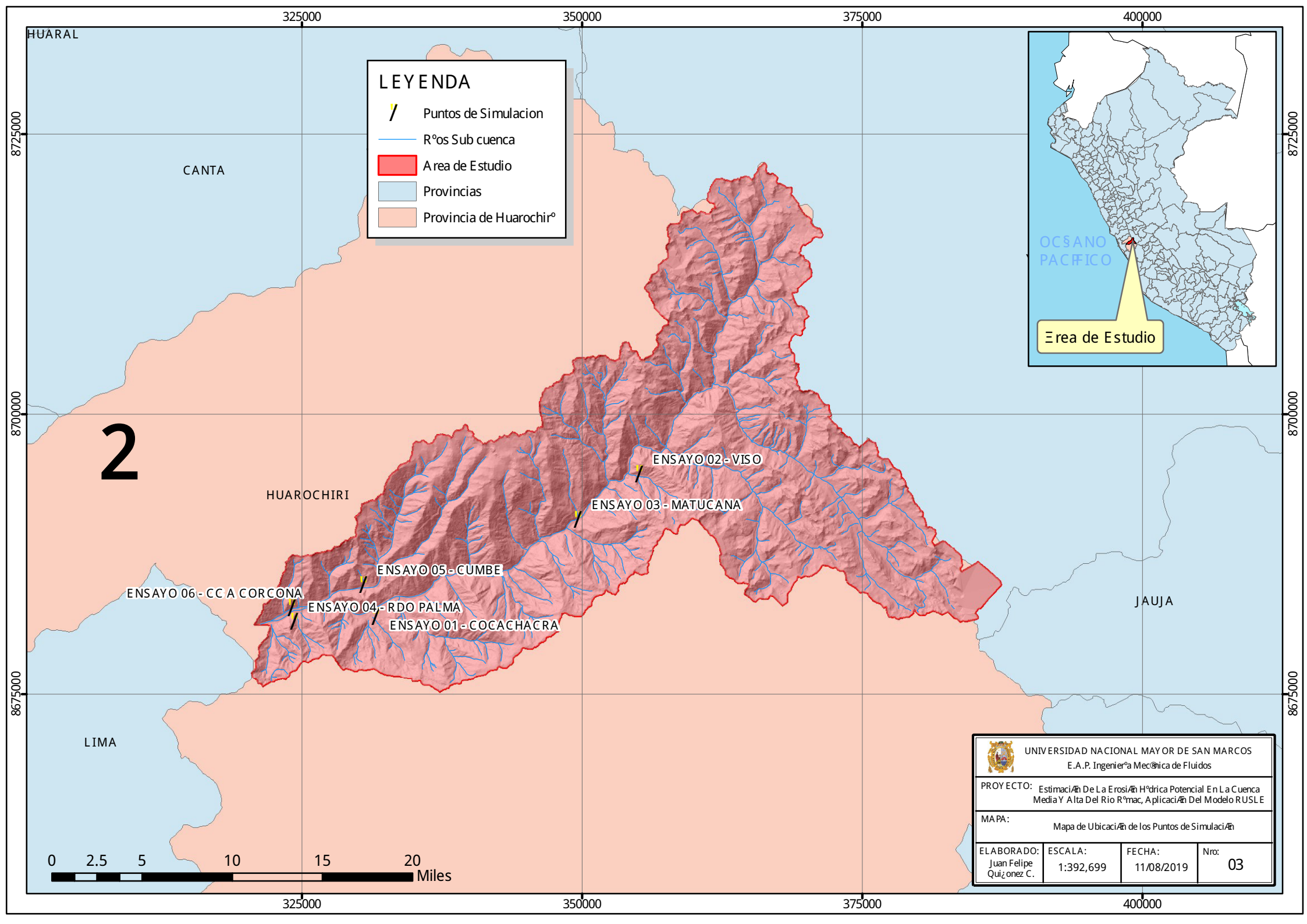
$$\frac{\alpha}{2} = 0.025$$

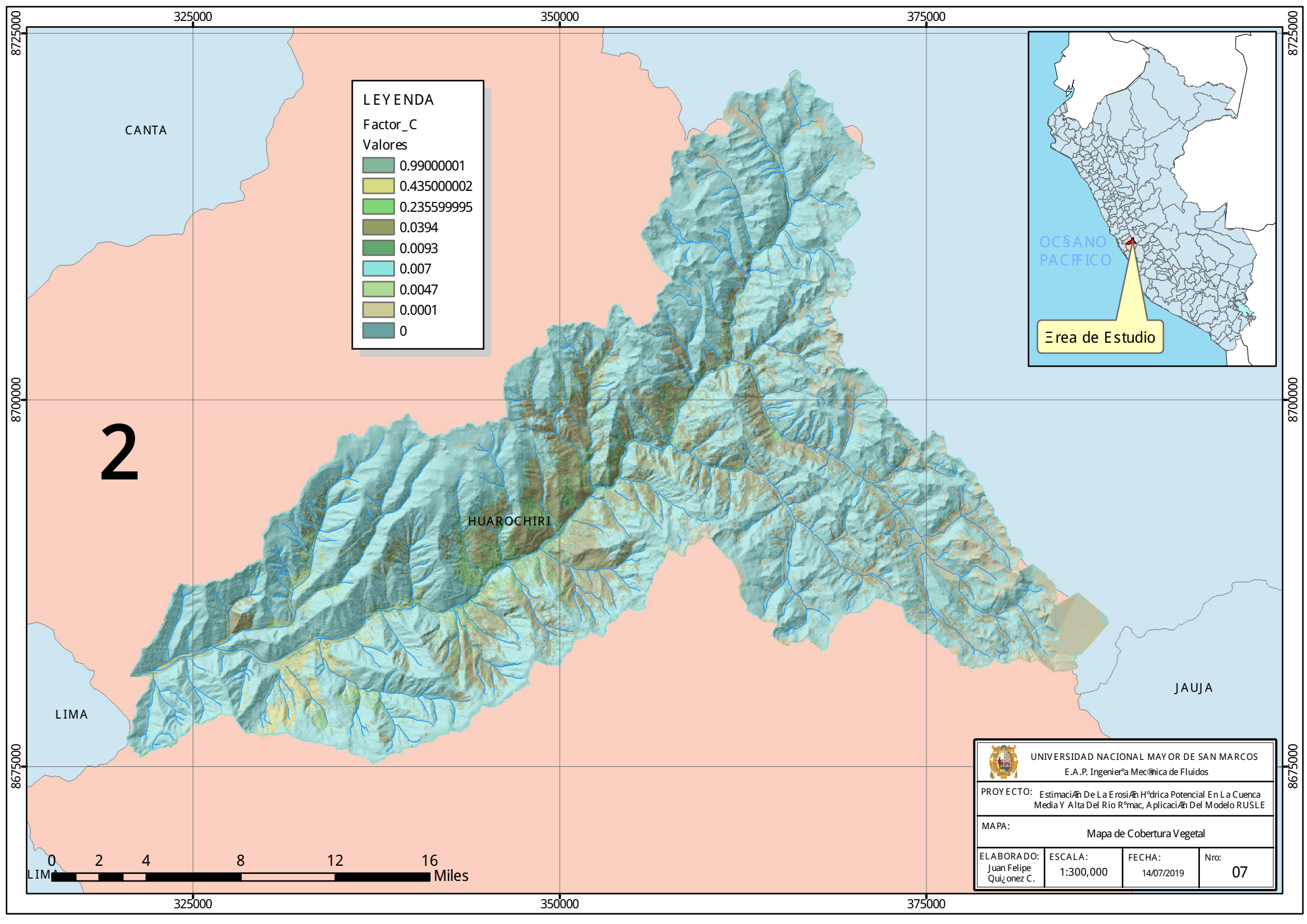
$$G.L. = n - 2$$

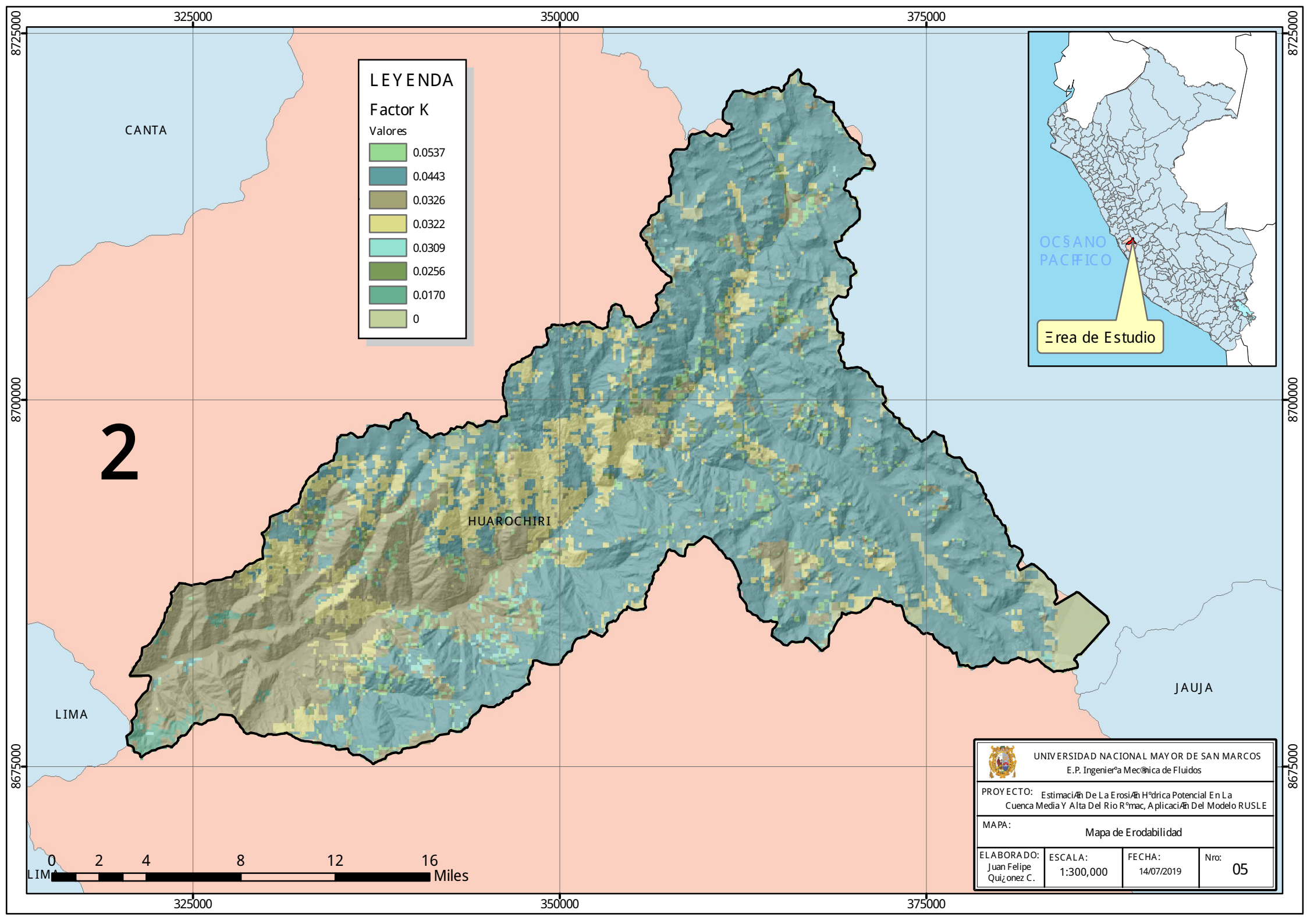
3. Comparación del t_c con el t_t

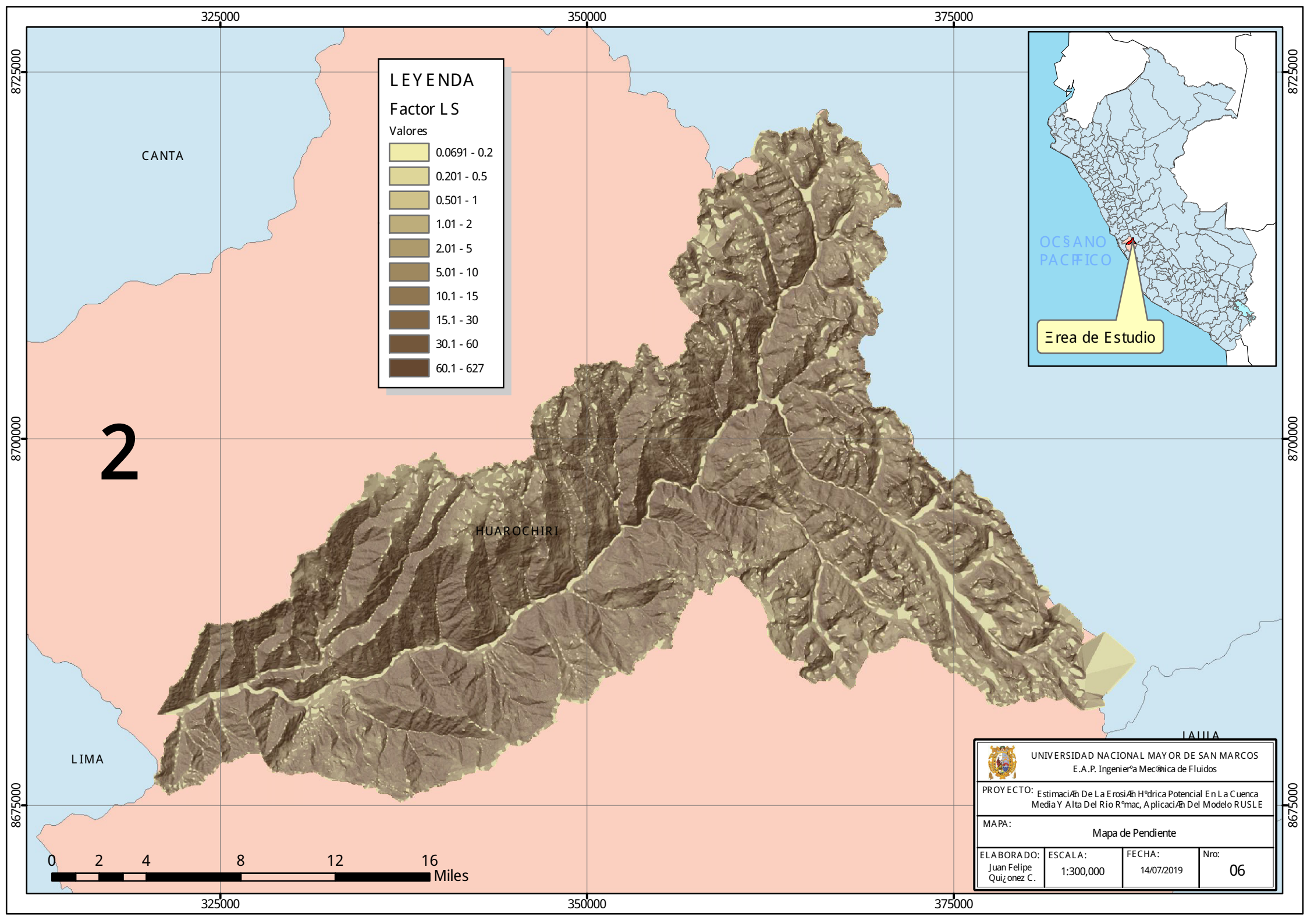
- Si $|t_c| \leq t_t$ (95%) $\rightarrow R$ no es significativo
En este caso, la tendencia no es significativa y no hay que corregir.
- Si $|t_c| > t_t$ (95%) $\rightarrow R$ sí es significativo.
En este caso, la tendencia es significativa y hay necesidad de corregir la información de tendencia en la media.

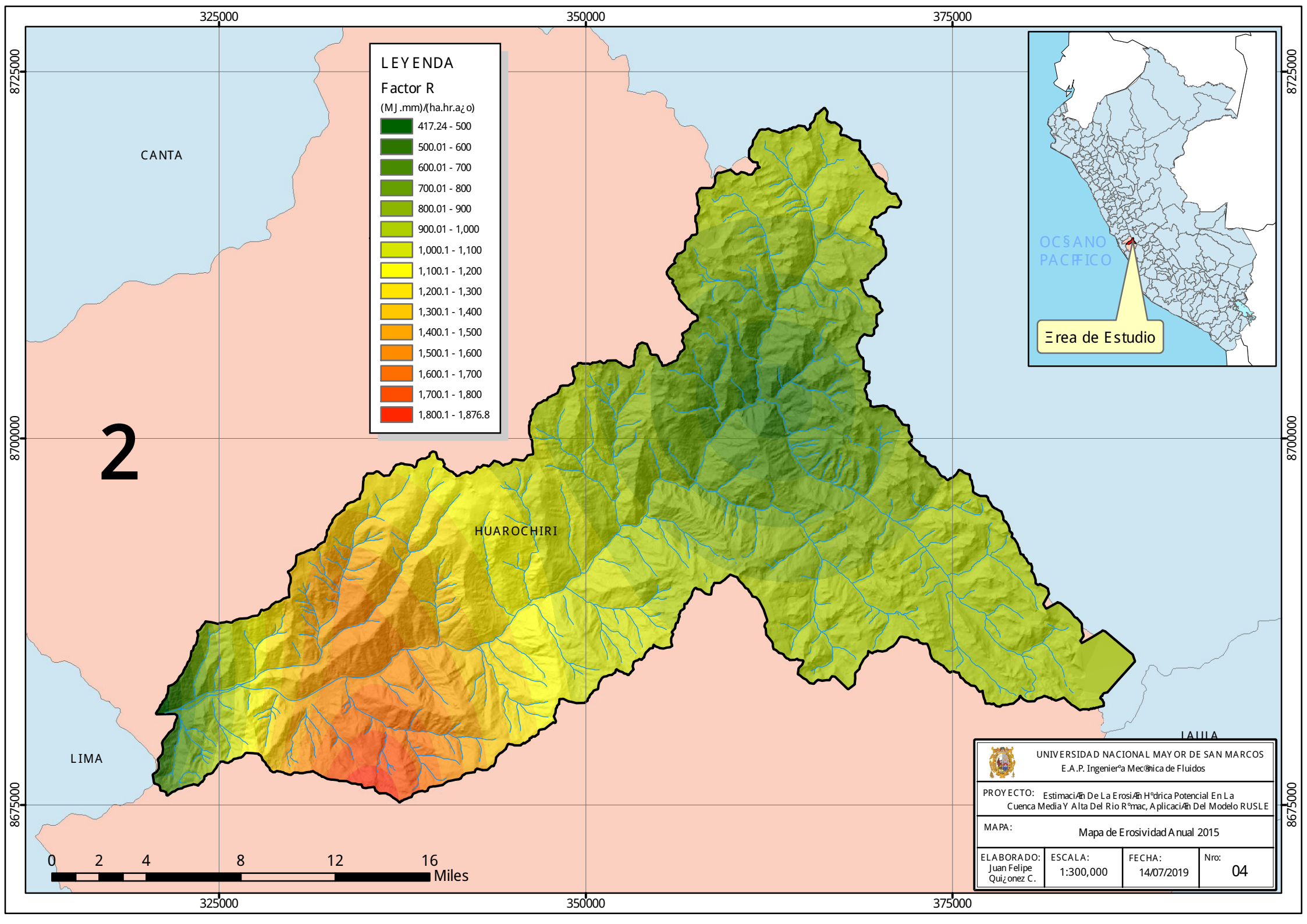
ANEXO I
Mapas - Formato A4

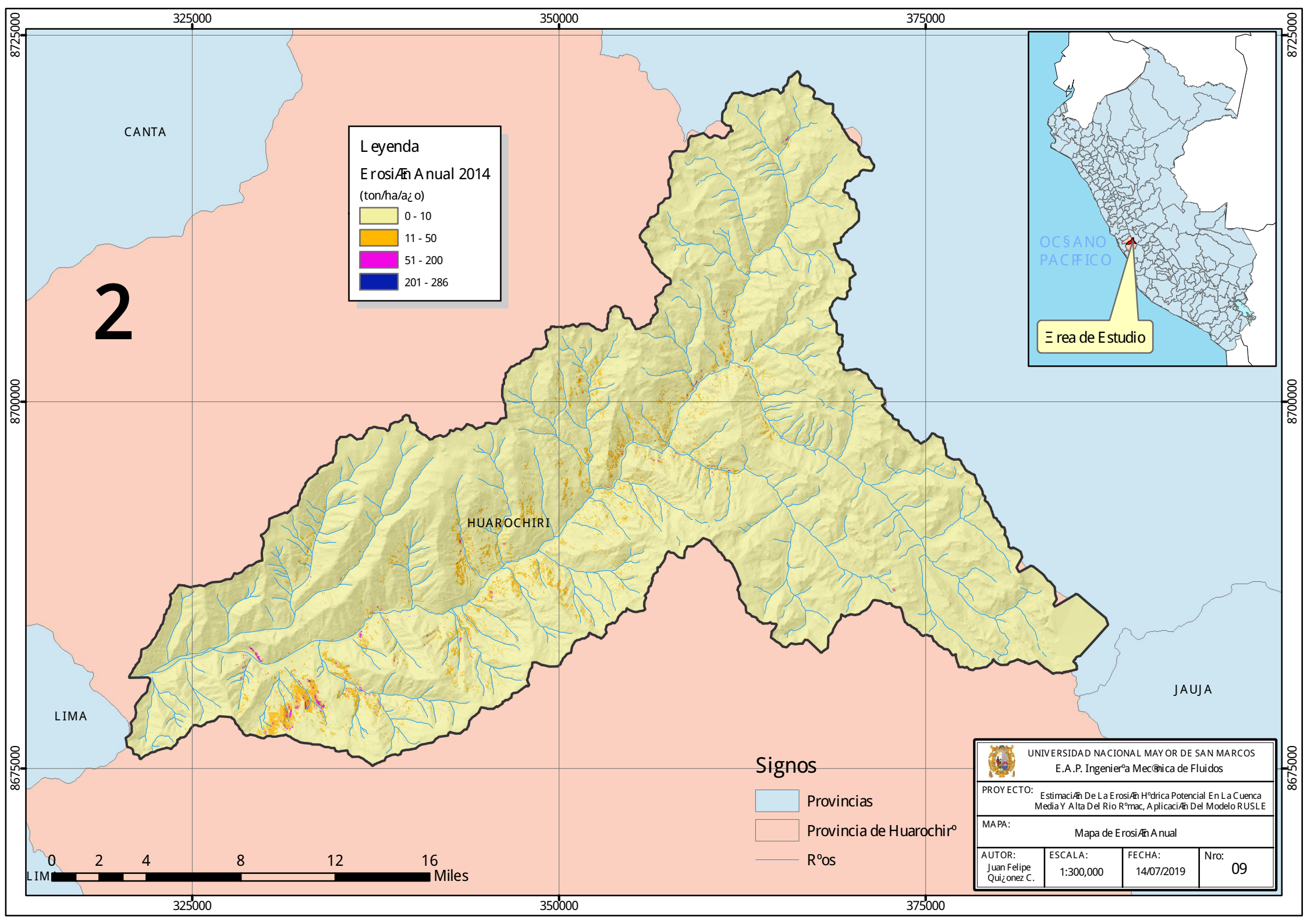













Leyenda
Erosión Anual 2014
(ton/ha/año)

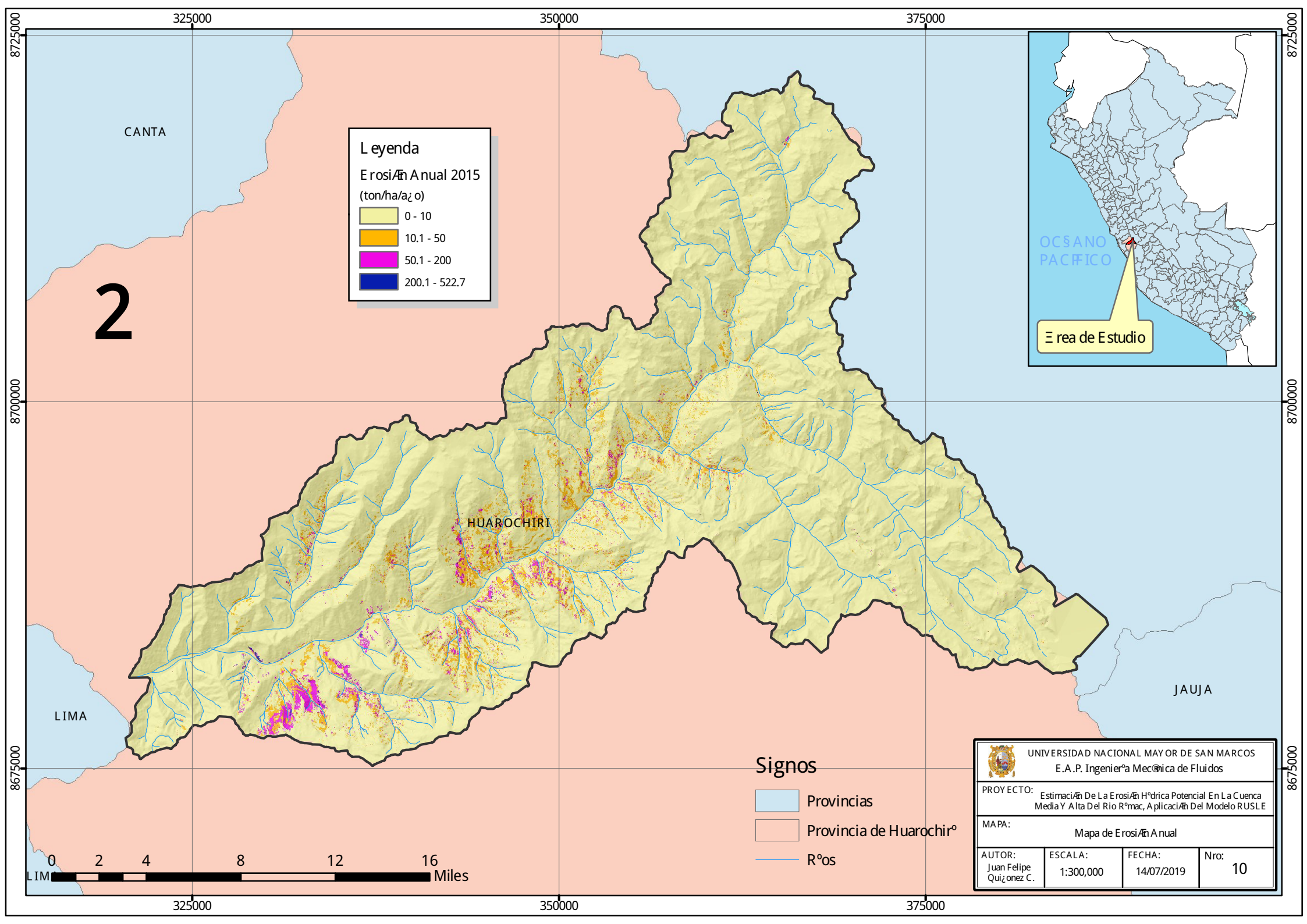
0 - 10
11 - 50
51 - 200
201 - 286

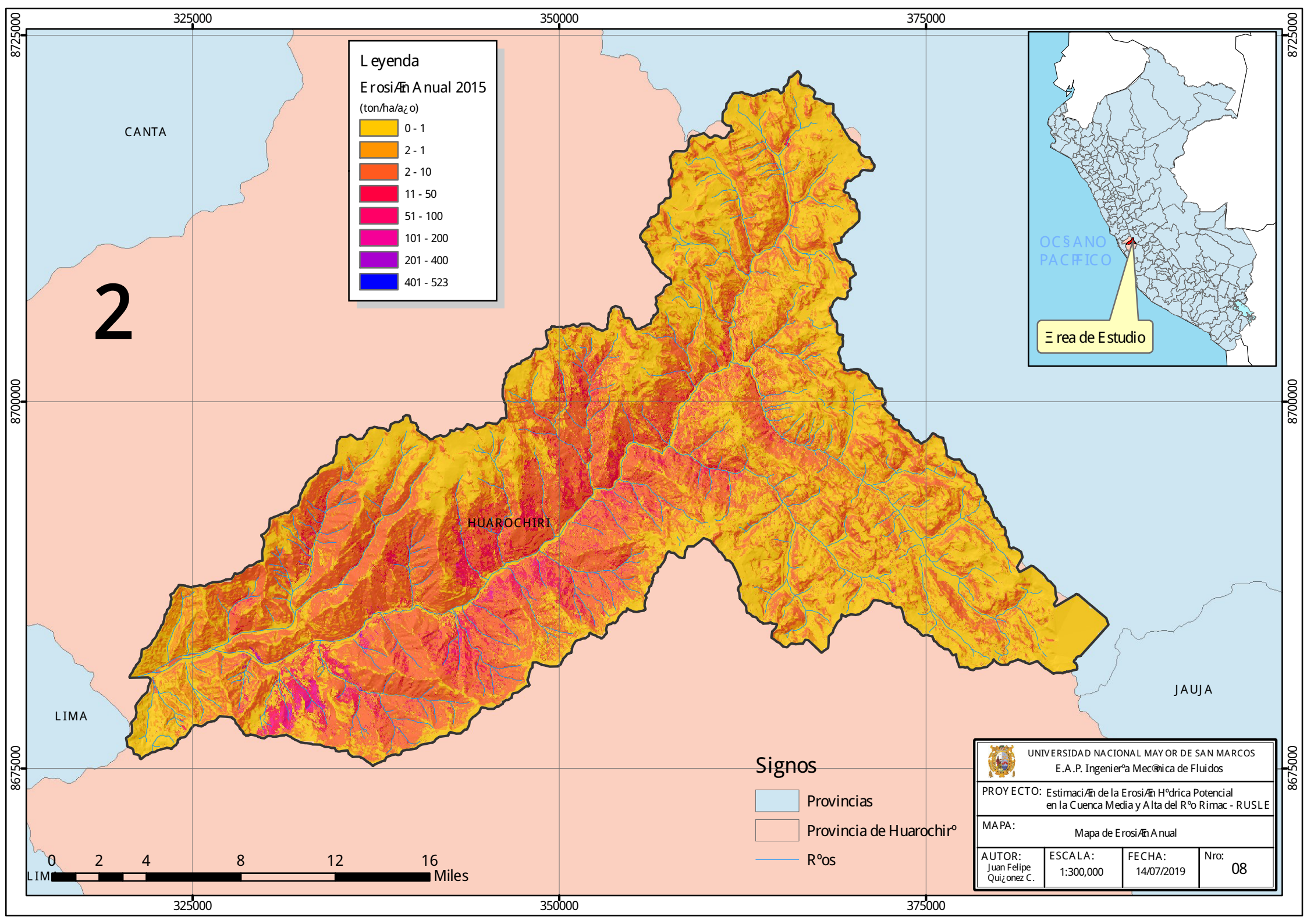


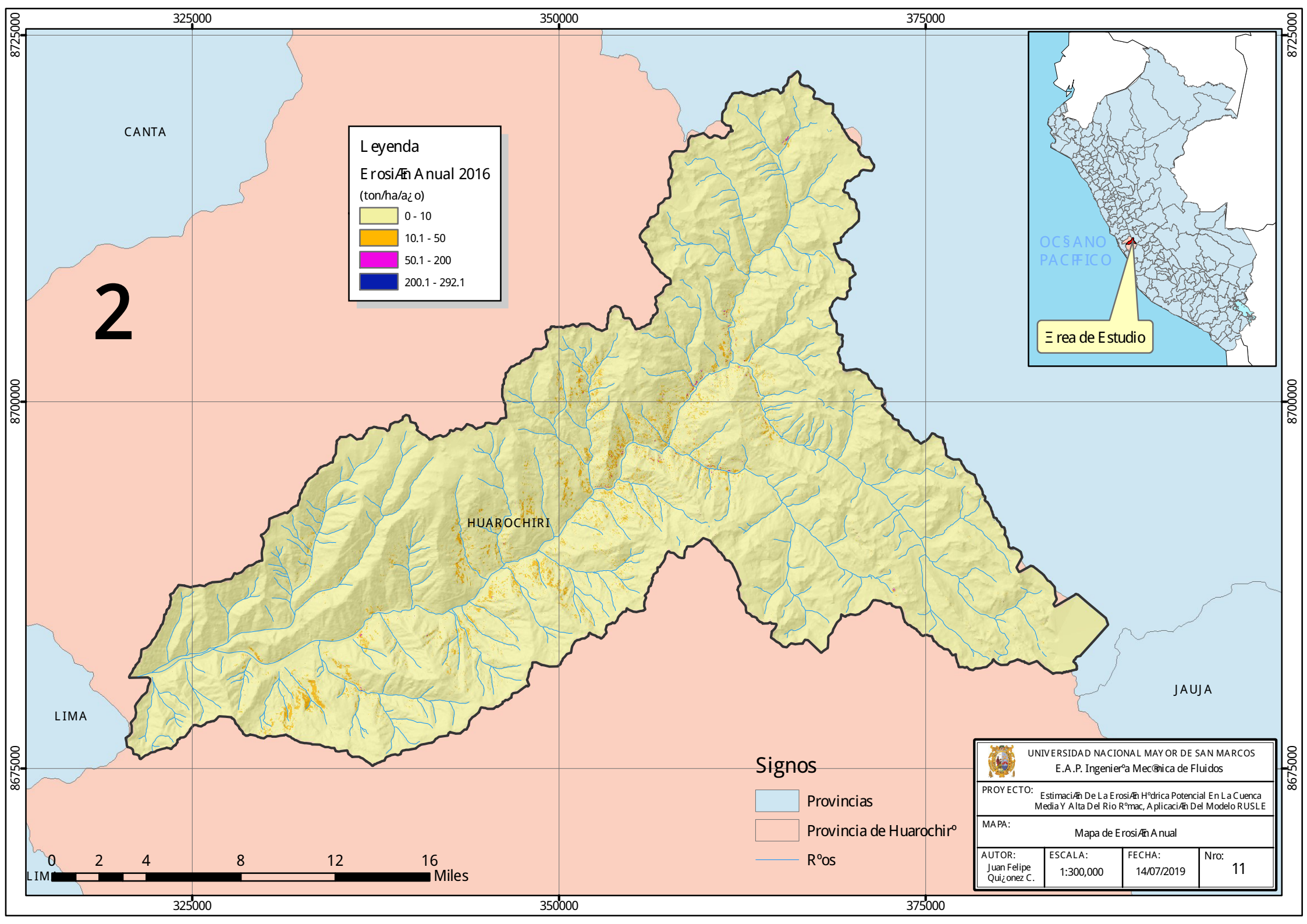
Signos

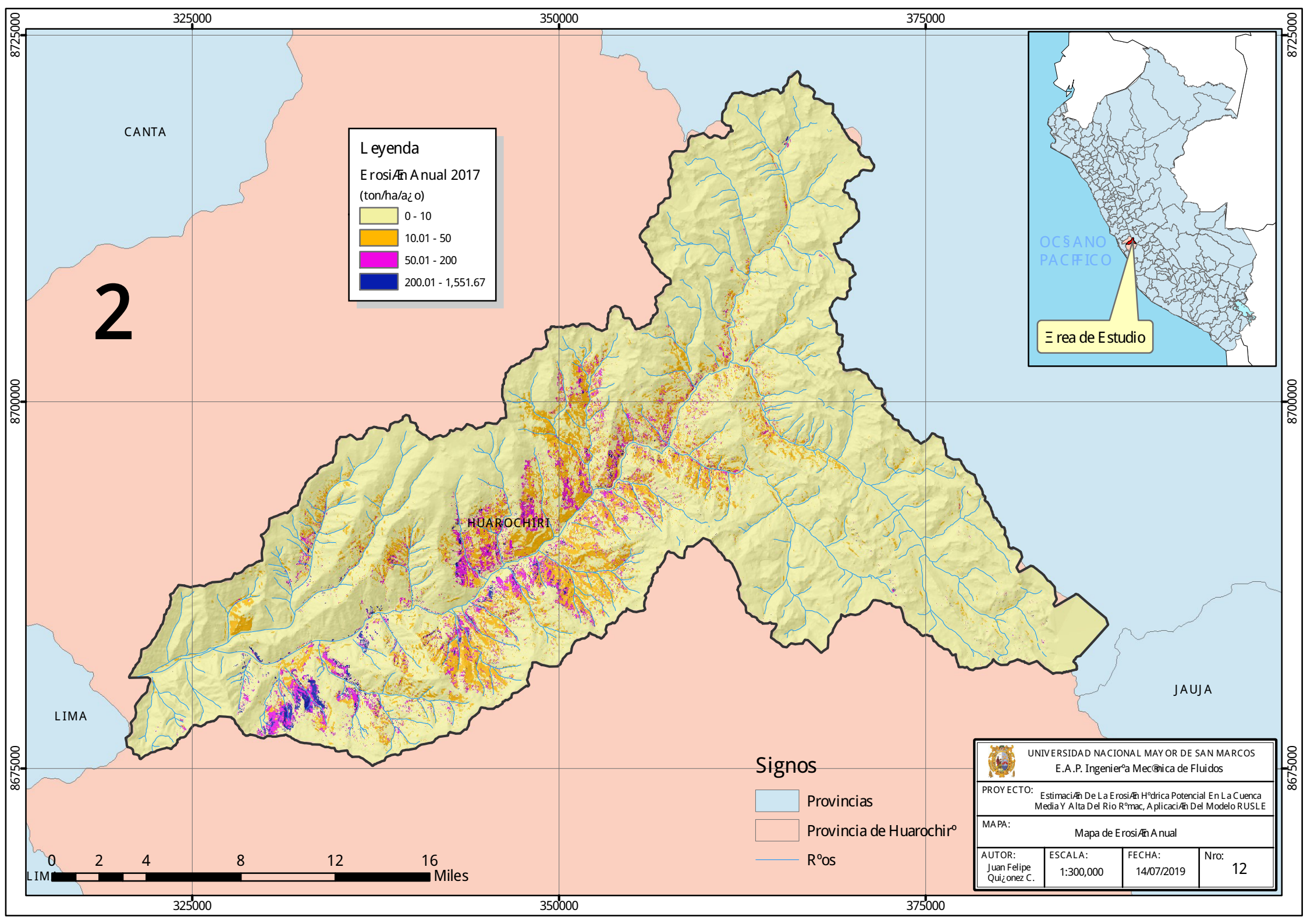
- Provincias
- Provincia de Huarochirº
- Rºos

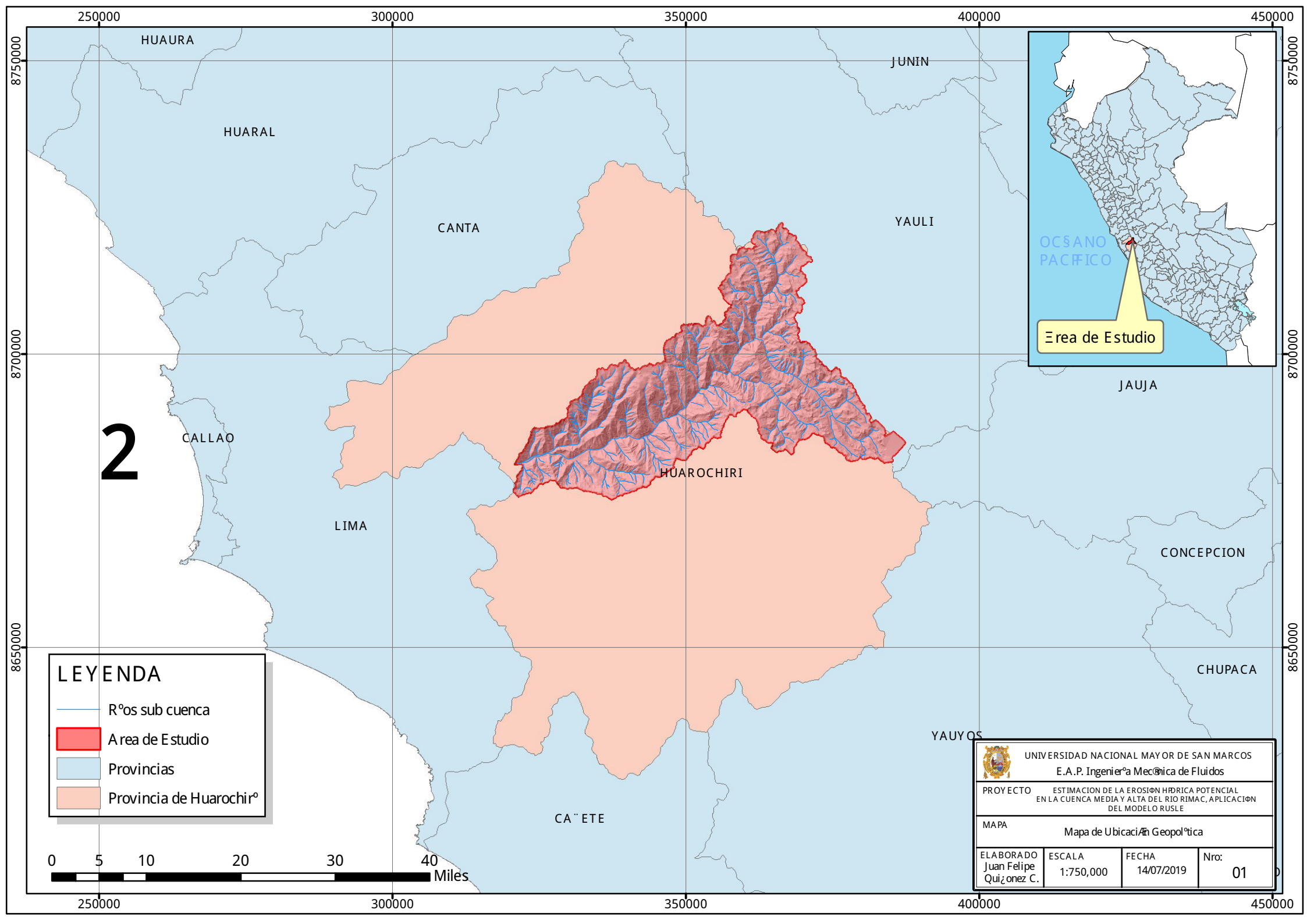
 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS E.A.P. Ingeniería Mecánica de Fluidos			
PROYECTO: Estimación De La Erosión Hídrica Potencial En La Cuenca Media Y Alta Del Río Rímac, Aplicación Del Modelo RUSLE			
MAPA: Mapa de Erosión Anual			
AUTOR: Juan Felipe Quiroz C.	ESCALA: 1:300,000	FECHA: 14/07/2019	Nro: 09







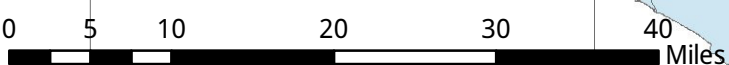





2

LEYENDA

- R^{os} sub cuenca
- Area de Estudio
- Provincias
- Provincia de Huarochir^o



 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS E.A.P. Ingeniería Mecánica de Fluidos			
PROYECTO ESTIMACION DE LA EROSION HIDRICA POTENCIAL EN LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RIO RIMAC, APLICACION DEL MODELO RUSLE			
MAPA Mapa de Ubicación Geopolítica			
ELABORADO Juan Felipe Quiroz C.	ESCALA 1:750,000	FECHA 14/07/2019	Nro: 01

2

JUNIN

RIO BLANCO

LIMA

CANCHACALLA

MATUCANA

SANTA EULALIA

CHOSICA

SANTIAGO DE TUNA

LEYENDA

- Estaciones Meteorológicas
- R^{os}
- Area de Estudio
- L^ímite de Departamento

0 2.5 5 10 15 20
Kilometers

SISTEMA DE COORDENADAS UTM-WGS84



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
E.A.P. Ingeniería Mecánica de Fluidos

PROYECTO: Estimación de la Erosión Hídrica Potencial en la Cuenca
Media y Alta del Río Rimac, Aplicación del Modelo RUSLE

MAPA: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas
Convencionales Consideradas

ELABORADO:
Juan Felipe
Quiroz Cándor

ESCALA:
1:300,000

FECHA:
14/07/2019

Nro:
02